



Euclides José de Carvalho Silva
Rodrigues

Galgamento de Estruturas Marítimas

Comparação de Ferramentas de Cálculo

Dissertação apresentada para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Construção Civil.

Realizada sob a orientação científica da
Dr.^a Maria Teresa Leal Gonsalves Veloso dos Reis
do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e
co-orientação da
Dr.^a Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves
do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e da
Professora Mestre Rita Salgado Brito da Escola
Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto
Politécnico de Setúbal.

Novembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Finalizada uma etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o mais profundo agradecimento a todos aqueles que me apoiaram nesta longa caminhada e contribuíram para a realização desta dissertação.

À Dr.^a Maria Teresa Leal Gonsalves Veloso dos Reis, pela orientação séria e minuciosa, pela crítica construtiva, pela disponibilidade de todos os momentos, pela amizade com que sempre me distinguiu, compreensão, ajuda, confiança demonstrada e valiosos conselhos que se revelaram fundamentais para a realização desta dissertação. O seu exemplo certamente acompanhar-me-á como referência pelo resto da minha vida.

A Dr.^a Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves pelo tempo que generosamente me dedicou transmitindo-me os mais úteis ensinamentos, pela amabilidade, pelos seus esclarecimentos e auxílio prestado em todas as fases deste trabalho, os quais foram cruciais para o desenvolvimento e concretização da dissertação.

À Prof.^a Mestre Rita Salgado Brito, pelo apoio incondicional e permanente orientação prestada, pela sua disponibilidade, interesse, carinho e acompanhamento.

Um especial agradecimento à Dr.^a Juana Fortes e ao Eng.^o João Santos pelo incondicional incentivo, ajuda e conselhos.

Um sentido agradecimento ao Eng.^o Gabriel Silva, pela amizade e pela sabedoria transmitida.

Ao Eng.^o Rui Capitão, pela ajuda e esclarecimentos.

Aos meus colegas que me acompanharam: Gonçalo Jesus, Jorge Gadelho, Edgar Matias, Sara Rodrigues, Diogo Neves, Joel Vasco, Maria de Fátima, pela amizade, pelos bons momentos que partilhámos, pelos preciosos ensinamentos e pela confiança que recebi.

À Eng.^a Ana Mendonça, pela amizade, pelo apoio competente e incansável, pelas frequentes e enriquecedoras trocas de ideias e ajuda que me presenteou ao longo de todo este trabalho, exprimo a minha viva e cordial gratidão.

Cumpre-me dirigir o meu reconhecimento ao Eng^o Carlos Galvão, João Silva, Gil Sousa, Odair Fortes e Ana Passarinho pela amizade e auxílio na componente laboratorial desta dissertação.

A todos os funcionários do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela forma como me receberam, boa disposição e simpatia característica ao longo de todo este período.

Ao Prof. Dr. João Vinagre pela excelente pessoa que é, pela confiança, amizade e ensinamentos transmitidos ao longo do meu percurso académico na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro.

À Prof.^a Dr.^a Otília Dias pela confiança, amizade, carinho e ensinamentos transmitidos.

Aos colegas que tive durante o meu período de trabalho na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, e amigos que se tornaram, pelo inigualável ambiente proporcionado, espírito de entreajuda sempre patente e força transmitidos.

Dirijo ainda um agradecimento muito especial à minha família que muito contribuiu para que eu pudesse realizar este trabalho, pelo constante amparo e motivação. No fundo, à minha família a quem devo os valores de união e auxílio incondicionais.

E no centro de tudo aos meus Pais pelo incansável amor dado, associado a uma força interior e a uma crença nas minhas capacidades que fazem hoje a pessoa que sou. À coragem que a minha mãe me deixou quando a vida quis que ela não estivesse até ao fim deste percurso... estou contudo convencido que se estivesse aqui estaria muito orgulhosa neste momento por não ter baixado os braços.

Por todos eles e aos que não referi mas que sem dúvida contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, o meu profundo reconhecimento.

RESUMO

A segurança e funcionalidade dos portos, muitas vezes expostos a condições extremas de agitação marítima, dependem, em grande parte, do comportamento dos quebra-mares que os protegem no que respeita à sua estabilidade e galgamentos. O dimensionamento destas estruturas é, em geral, e mais concretamente no que diz respeito ao galgamento, realizado com base em expressões empíricas e na experiência acumulada dos projectistas, já que, actualmente não é ainda possível representar matematicamente todas as variáveis intervenientes no fenómeno de interacção entre a agitação marítima e as estruturas.

O desenvolvimento de muitas das expressões matemáticas para calcular o galgamento resultou, na maioria dos casos, de dados de ensaios em modelo físico reduzido e, por isso, apenas são válidas para determinadas condições de agitação, determinadas geometrias da estrutura e determinados tipos de materiais ou blocos constituintes idênticos aos utilizados nos referidos ensaios.

Como tal, qualquer intervenção, seja ela para construção de uma nova estrutura, ou alteração de uma já existente, obriga, quando se trata de obras de grande dimensão, à realização de ensaios em modelo reduzido, que constituem até à data a metodologia que melhor retrata os fenómenos intervenientes no protótipo, apesar dos efeitos de escala e de modelo que possam existir.

O presente trabalho estuda o fenómeno do galgamento em estruturas marítimas utilizando diversas metodologias (fórmulas empíricas, redes neuronais e modelação física) e analisa e quantifica o galgamento para um caso de estudo da costa portuguesa. O caso de estudo é o quebra-mar do Porto de Rabo de Peixe (São Miguel, Açores), cujos ensaios foram realizados no Pavilhão de Hidráulica Marítima do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Comparam-se os valores do caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura obtidos nos ensaios em modelo físico reduzido com os valores provenientes da aplicação das ferramentas empíricas recomendadas no manual Europeu dos galgamentos

(Pullen *et al.*, 2007) para o quebra-mar em estudo, isto é, fórmulas empíricas e uma ferramenta que resulta da análise de redes neuronais artificiais.

O estudo efectuado mostra que as ferramentas disponíveis para o cálculo do galgamento têm limitações e vantagens, as quais devem ser tidas em conta aquando da necessidade de as aplicar, consoante a fase do projecto.

Das três ferramentas comparadas, as fórmulas empíricas foram as que apresentaram maiores limitações ao estimar os caudais por defeito, sendo recomendadas apenas para a fase de Estudo Prévio.

A ferramenta baseada na análise de redes neuronais teve um comportamento bastante satisfatório, semelhante ao do modelo físico, mas prevendo caudais médios superiores, sendo também recomendada para a fase de Estudo Prévio.

A solução mais completa e cujo comportamento é mais próximo da realidade, embora com maiores limitações a nível de custo em projecto, é o modelo físico tridimensional. Esta ferramenta é por isso recomendada para verificação e optimização do projecto de execução da obra. Salienta-se ainda que, em geral, o custo da construção e exploração do modelo físico varia entre 0.5% e 1.5% do valor global da obra.

Palavras-Chave: Estruturas marítimas, galgamento, modelação física, fórmulas empíricas, redes neuronais

ABSTRACT

The safety and functionality of seaports exposed to extreme sea conditions depend in most cases on the strength and behaviour of the protecting breakwater, in particular on their stability and wave overtopping. The design of these structures relies upon empirical expressions and previous engineering experience, since, currently it is not possible to mathematically describe all the physical processes involved in the interaction between sea-wave conditions and the structures.

In most cases, the development of mathematical expressions to calculate wave overtopping is based on data obtained from physical model tests. The data validity is restricted to the sea-wave conditions, structure geometries and materials used in the models.

As such, any large-scale intervention, whether in a new structure or on existing ones, requires physical model tests. So far, physical modelling represents the most accurate methodology to portrait the prototype interactions, despite scale and model effects that may occur.

This study analyses the wave overtopping of maritime structures using various methodologies (empirical formulas, neural networks and physical modelling) and quantifies the overtopping for a case study on the Portuguese coast. The case study is the breakwater of the Port of Rabo de Peixe (São Miguel, Azores), which was tested at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC). Results are based upon values of the mean wave overtopping discharge per meter length of the structure. A comparison is made between the physical model results and the values obtained both using the empirical formulas recommended in the wave overtopping manual and using an empirical tool based on the analysis of artificial neural networks (Pullen *et al.*, 2007).

The study shows that the available tools for the mean overtopping discharge calculation have both advantages and limitations, which should be considered whenever applied to a project.

From the three tools applied, the empirical formulas presented more limitations, being recommended for conceptual design only.

The tool based on artificial neural networks presented similar results to the physical model although it tended to over predict the overtopping discharges, being also recommended for conceptual design.

The most complete and accurate tool was the three-dimensional physical model, which is recommended for the verification and optimization of the final project. Note that, generally speaking, the cost for construction and exploitation of a physical model varies between about 0.5% and 1.5 % of the overall project cost.

Keywords: Maritime structures, wave overtopping, physical modelling, empirical formulas, neural networks

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Objectivos e Metodologia	4
1.3. Estrutura da Dissertação	5
2. CARACTERIZAÇÃO DO GALGAMENTO.....	7
2.1. Considerações Gerais	7
2.2. Factores Condicionantes.....	10
2.2.1. Agitação Marítima.....	10
2.2.2. Nível de Água.....	14
2.2.3. Geometria da Estrutura.....	14
3. MODELAÇÃO FÍSICA E MÉTODOS DE CÁLCULO.....	17
3.1. Introdução	17
3.2. Modelação Física	19
3.2.1. Semelhança entre o Modelo e o Protótipo	19
3.2.2. Teoria da Semelhança.....	20
3.2.3. Efeitos de Escala.....	21
3.2.4. Efeitos de Modelo.....	24
3.2.5. Efeitos de Medição	25
3.3. Expressões Empíricas.....	25
3.4. Redes Neurais.....	32
3.4.1. Introdução	32
3.4.2. Sistema Nervoso	33
3.4.3. Redes Neurais Artificiais.....	33
3.4.4. Ferramenta NN_OVERTOPPING2	35

4. CASO DE ESTUDO	41
4.1. Porto de Pesca de Rabo de Peixe.....	41
4.2. Modelação Física	47
4.2.1. Enquadramento	47
4.2.2. Objectivo dos Ensaios	47
4.2.3. Instalação Experimental.....	47
4.2.4. Obra Ensaçada.....	50
4.2.5. Níveis de Maré e Agitação Marítima	52
4.2.6. Medição da Agitação Marítima.....	54
4.2.7. Avaliação do Galgamento.....	55
4.2.8. Metodologia dos Ensaios.....	56
4.2.9. Resultados dos Ensaios	57
4.3. Métodos de Cálculo.....	65
4.3.1. Fórmulas Empíricas.....	65
4.3.2. NN_OVERTOPPING2	69
4.4. Comparação de Resultados	73
5. CONCLUSÕES.....	81
5.1. Síntese e Conclusões Gerais	81
5.2. Modelo Físico	82
5.3. Fórmulas Empíricas.....	83
5.4. NN_OVERTOPPING2	83
5.5. Estudo Comparativo	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Galgamento de estruturas marítimas (Arquivo Fotográfico do LNEC).....	2
Figura 2 - Representação esquemática do fenómeno do galgamento (Brito, 2007)	7
Figura 3 - Espraimento de onda sobre talude	8
Figura 4 - Rebentação da onda do tipo progressivo (USACE, 2006)	12
Figura 5 - Rebentação da onda do tipo mergulhante (USACE, 2006)	12
Figura 6 - Rebentação da onda do tipo colapsante (USACE, 2006).....	12
Figura 7 - Rebentação da onda do tipo de fundo (USACE, 2006)	13
Figura 8 - Ângulo entre a direcção de propagação da agitação e a normal à estrutura (β). 13	
Figura 9 - Representação esquemática de alguns parâmetros que definem a geometria da estrutura e que influenciam o galgamento	15
Figura 10 - Fenómenos e efeitos de escala na modelação das forças, das ondas e na resposta da estrutura marítima (adaptado de Führböter, 1986)	21
Figura 11 - Ecrã de escolha do tipo de estrutura em estudo para aplicação das fórmulas empíricas (http://www.overtopping-manual.com/calculation_empirical.html)	28
Figura 12 - Exemplo de uma janela para introdução dos parâmetros hidráulicos e estruturais para a previsão do caudal médio galgado	29
Figura 13 - Esquema de um neurónio artificial (Tafner, 1998).....	34
Figura 14 - Exemplo de rede neuronal com duas camadas, quatro entradas e duas saídas (Tafner, 1998).....	35
Figura 15 - Esquema das redes neuronais em que se baseia a ferramenta NN_OVERTOPPING2	36
Figura 16 - Parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2	37
Figura 17 - Localização do Porto de Rabo de Peixe (Google, 06/12/2010)	41
Figura 18 - Agitação dominante ao largo (Consulmar, 2010)	41
Figura 19 - Vista geral do Porto de Rabo de Peixe	42
Figura 20 - Cabeça do molhe.....	42
Figura 21 - Planta do molhe-cais do Porto de Rabo de Peixe	43

Figura 22 - Pormenor do muro-cortina	43
Figura 23 - Perfis tipo da secção transversal do molhe-cais do Porto de Rabo de Peixe	44
Figura 24 - Obra existente e galgamento do muro-cortina	45
Figura 25 - Instalação de ensaio e gerador de ondas irregulares.....	48
Figura 26 - Instalação de ensaio. Localização do modelo do porto e do equipamento de geração de ondas e de medição.....	49
Figura 27 - Fases de construção do modelo do Porto de Rabo de Peixe.....	50
Figura 28 - Obras de expansão do Porto de Rabo de Peixe	51
Figura 29 - Localização das sondas.....	54
Figura 30 - Recipiente para recolha de água dos galgamentos	56
Figura 31 - Condições de agitação para: PM, $T_p=14$ s e $H_s=5.0$ m.....	60
Figura 32 - Galgamento provocado por salpicos: BM, $T_p=14$ s e $H_s=5.0$ m	60
Figura 33 - Galgamento provocado por lâminas de água: PM, $T_p=14$ s e $H_s=7.0$ m.....	60
Figura 34 - Caudal médio de galgamento no modelo físico para BM	62
Figura 35 - Caudal médio de galgamento no modelo físico para PM	63
Figura 36 - Caudal médio de galgamento no modelo físico para PM+S.....	64
Figura 37 - Ecrã de escolha da metodologia de cálculo do galgamento para o tipo de estrutura em estudo (http://www.overtopping-manual.com/ calculation_tool.html)	65
Figura 38 - Caudal médio de galgamento resultante das fórmulas empíricas para BM.....	67
Figura 39 - Caudal médio de galgamento resultante das fórmulas empíricas para PM.....	68
Figura 40 - Caudal médio de galgamento resultante das fórmulas empíricas para PM+S....	68
Figura 41 - Caudal médio de galgamento resultante do NN_OVERTOPPING2 para BM.....	71
Figura 42 - Caudal médio de galgamento resultante do NN_OVERTOPPING2 para PM.....	72
Figura 43 - Caudal médio de galgamento resultante do NN_OVERTOPPING2 para PM+S	72
Figura 44 - Comparação de resultados para BM entre NN_OVERTOPPING2 e o modelo físico	75
Figura 45 - Comparação de resultados para BM entre as fórmulas empíricas e o modelo físico	76

Figura 46 - Comparação de resultados para PM entre NN_OVERTOPPING2 e o modelo físico	77
Figura 47 - Comparação de resultados para PM entre as fórmulas empíricas e o modelo físico	78
Figura 48 - Comparação de resultados para PM+S entre NN_OVERTOPPING2 e modelo físico	78
Figura 49 - Comparação de resultados para PM+S entre as fórmulas empíricas e o modelo físico	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Valores críticos do caudal médio de galgamentos (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007).....	9
Tabela 2	- Resumo dos métodos de escala (Kortenhaus <i>et al.</i> , 2005)	22
Tabela 3	- Valores do coeficiente de rugosidade/permeabilidade para alguns tipos de manto de protecção (adaptado de Coeveld <i>et al.</i> , 2005).....	38
Tabela 4	- Condições de nível de maré e de agitação marítima reproduzidas nos ensaios de galgamento (valores do protótipo).....	53
Tabela 5	- Critério do LNEC de classificação de galgamentos do muro-cortina (LNEC, 1984).....	55
Tabela 6	- Grau de galgamentos para - BM, PM e PM+S	59
Tabela 7	- Resultados das medições do caudal médio de galgamentos (valores do protótipo).....	61
Tabela 8	- Resultados das fórmulas empíricas para o caudal médio de galgamentos	66
Tabela 9	- Parâmetros de entrada no programa NN_OVERTOPPING2.....	69
Tabela 10	- Resultados do programa NN_OVERTOPPING2 para o caudal médio de galgamentos	70
Tabela 11	- Parâmetros considerados em cada ferramenta para a previsão do galgamento.....	73
Tabela 12	- Resultados do Modelo Físico, NN_OVERTOPPING2 e Fórmula Empírica	74

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b	Coeficientes empíricos presentes em fórmulas empíricas de cálculo do galgamento [-]	
A_c	Distância entre o nível de repouso e a berma de coroamento da estrutura	[m]
B	Largura da berma da estrutura	[m]
BM	Baixa-mar	[m]
B_t	Largura da banquetta do pé do talude	[m]
C_r	Factor que leva em conta a berma de coroamento	[-]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
G_c	Largura da berma de coroamento da estrutura	[m]
h	Profundidade em frente à estrutura	[m]
h_b	Profundidade na berma da estrutura	[m]
h_t	Profundidade na banquetta do pé do talude	[m]
H	Altura da onda	[m]
H_{m0}	Altura de onda significativa em frente à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro (m_0)	[m]
H_s	Altura de onda significativa (média das alturas do terço mais alto das ondas de um registo)	[m]
k	Compressibilidade do fluido	[m ² /N]
L	Comprimento de onda	[m]
L_{0m}	Comprimento de onda ao largo, calculado com T_m	[m]
L_{0p}	Comprimento de onda ao largo, calculado com T_p	[m]
m_0	Momento de ordem zero do espectro	[m ²]
m_{-1}	Momento de ordem -1 do espectro	[m]
N	Relação entre as medidas no protótipo e as medidas no modelo	[-]
NR	Nível de repouso da superfície livre	[-]
N_{ac}	Escala de aceleração	[-]
N_A	Escala de área	[-]

N_F	Escala de força	[-]
N_k	Escala de compressibilidade	[-]
N_L	Escala geométrica	[-]
N_m	Escala de massa	[-]
N_p	Escala de pressão	[-]
N_q	Escala do caudal	[-]
N_t	Escala de tempos	[-]
N_T	Escala cinemática	[-]
N_u	Escala de velocidade	[-]
N_v	Escala de volume	[-]
N_v	Escala de viscosidade cinemática	[-]
N_ρ	Escala de massa volúmica	[-]
N_χ	Escala de tensão superficial	[-]
PM	Preia-mar	[m]
PM+S	Preia-mar com sobrelevação meteorológica	[m]
q	Caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura	[m ³ /s/m]
q`	Caudal médio galgado por metro de desenvolvimento após a berma de coroamento	[m ³ /s/m]
q _{MF}	Caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura obtido no modelo físico	[m ³ /s/m]
q _{FE}	Caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura obtido através de fórmulas empíricas	[m ³ /s/m]
q _{NN}	Caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura obtido através da ferramenta NN_OVERTOPPING2	[m ³ /s/m]
Q	Caudal médio adimensionalizado	[-]
R	Altura adimensionalizada de coroamento da estrutura acima do nível de repouso	[-]
R _c	Altura de coroamento da parte impermeável da estrutura acima do nível de repouso	[m]
R _u	Espraiamento das ondas numa estrutura	[m]

S	Declividade da onda	[-]
S_{om}	Declividade da onda calculada com L_{om}	[-]
S_{op}	Declividade da onda calculada com L_{op}	[-]
T	Período da onda	[s]
T_m	Período médio das ondas de um registo	[s]
$T_{m-1,0}$	Período médio em frente à estrutura, obtido por análise espectral a partir dos momentos m_0 e m_{-1}	[s]
T_p	Período de pico do espectro	[s]
u	Velocidade do fluido	[m/s]
V	Volume da massa de água que galga a estrutura	[m ³]
ZH	Zero hidrográfico	[m]
α	Ângulo do talude com a horizontal	[°]
α_B	Ângulo da berma da estrutura com a horizontal	[°]
α_d	Ângulo do talude com a horizontal abaixo da berma da estrutura	[°]
α_u	Ângulo do talude com a horizontal acima da berma da estrutura	[°]
β	Ângulo de incidência da onda (ângulo entre a direcção de propagação da agitação e a direcção normal à estrutura)	[°]
γ_b	Coeficiente de redução do galgamento devido à presença de uma berma da estrutura	[-]
γ_h	Coeficiente de redução do galgamento devido ao efeito de baixas profundidades em frente à estrutura	[-]
γ_f	Coeficiente de redução do galgamento devido à rugosidade/permeabilidade da estrutura	[-]
γ_β	Coeficiente de redução do galgamento devido ao ângulo de incidência da onda na estrutura	[-]
θ	Direcção de propagação da onda	[°]
ν	Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]
ξ	Número de Iribarren	[-]

ξ_{om}	Número de Iribarren, correspondente ao período médio para ondas irregulares calculado com S_{om}	[-]
ξ_{op}	Número de Iribarren, correspondente ao período de pico para ondas irregulares calculado com S_{op}	[-]
π	Constante de Arquimedes	[-]
ρ	Massa volúmica do fluido	[kg/m ³]
χ	Tensão superficial do fluido	[N/m]

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Em Portugal, dada a extensão da sua costa, a concentração da população e das actividades económicas nas zonas costeiras e portuárias e a severidade do clima de agitação marítima, são frequentes as situações de emergência provocadas pelo estado do mar, que põem em causa a segurança de pessoas e bens, com consequências graves para a sociedade, a economia e o ambiente. A segurança e funcionalidade destas zonas dependem, em grande parte, do comportamento das estruturas marítimas que as protegem, especialmente no que respeita à sua estabilidade e ao galgamento.

O galgamento de estruturas marítimas, que se caracteriza pela passagem de água sobre o seu coroamento, é, em grande parte das situações, um condicionante para o dimensionamento das estruturas. Este dimensionamento é efectuado para um grau de galgamento admissível que varia consoante o tipo de estrutura galgada, a sua funcionalidade e as características da zona por ela protegida.

Em inúmeras situações, a ocorrência de galgamentos pode pôr em risco a segurança da própria estrutura marítima e das pessoas que se encontrem na sua superestrutura ou na zona por ela protegida (Figura 1). Pode ainda ter consequências graves, com custos avultados, para edificações, veículos, vias de comunicação (e.g. estradas marginais e linhas ferroviárias), infra-estruturas portuárias, etc. Pode também interferir com actividades que se desenvolvem na zona abrigada, como por exemplo, navegação, operações portuárias e actividades de índole turística, entre outras.



Figura 1 - Galgamento de estruturas marítimas (Arquivo Fotográfico do LNEC)

As normas (e.g. Puertos del Estado, 2002; USACE, 2003; CIRIA/CUR/CETMEF, 2007; PIANC, 1992) para o projecto, construção e manutenção de estruturas de engenharia, bem como a sociedade em geral, exigem, cada vez mais, uma quantificação dos riscos e um aumento da fiabilidade destas estruturas, nas quais se podem incluir as estruturas marítimas. Por outro lado, numa época de aquecimento global, subida do nível médio do mar e aumento de ocorrência de temporais, que podem resultar num aumento das solicitações nas estruturas, é fundamental a existência de ferramentas precisas e eficientes para o estudo do galgamento.

Actualmente, as ferramentas mais utilizadas para determinar o galgamento de uma estrutura marítima são as fórmulas empíricas (e.g. Van der Meer *et al.*, 1998; Besley, 1999; Pullen *et al.*, 2007) ou semi-empíricas (e.g. Hedges e Reis, 1998, 2004; Reis *et al.*, 2008), baseadas em resultados de ensaios em modelo físico.

Outro tipo de ferramentas empíricas que recentemente têm tido um papel importante na determinação do galgamento são as redes neurais artificiais, especialmente em fase de Estudo Prévio. A ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING2, baseada na análise de redes neurais e desenvolvida no âmbito do Programa Europeu CLASH, muito tem contribuído para tal (Coeveld *et al.*, 2005; Medina *et al.*, 2002, 2005; Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005).

A aplicação directa das ferramentas empíricas é válida apenas para as condições específicas que foram contempladas nos ensaios de base no que diz respeito à agitação marítima, ao nível de maré e às configurações, relativamente simples, das estruturas. Por outro lado, em casos práticos de Engenharia, cada vez mais se opta por configurações de menor impacto visual e ambiental, mas mais complexas e singulares e, como tal, não consideradas no desenvolvimento destas ferramentas.

Devido à melhoria dos meios de cálculo e ao desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais potentes, o uso deste tipo de modelos começa a tornar-se cada vez mais atractivo. Os modelos mais simples (Van Gent, 1994; Dodd, 1998; Hu, 2000; Hu *et al.*, 2000; Clarke *et al.*, 2004; Hu e Meyer, 2005; Reis *et al.*, 2009), apesar das suas limitações essencialmente relacionadas com as equações de base, têm como grande vantagem a rapidez de cálculo. Os modelos mais recentes são mais completos (Lin e Liu, 1998; Ingram *et al.*, 2002, 2004; Kortenhaus *et al.*, 2005; Shao *et al.*, 2006; Dalrymple e Rogers, 2006; Lara *et al.*, 2006; Losada *et al.*, 2008; Didier e Neves, 2009), mas a sua aplicação em casos práticos de engenharia tem ainda algumas limitações, apesar de serem mais flexíveis que as fórmulas empíricas ou os modelos físicos, já que uma vez calibrados e validados, podem ser configurados e aplicados com fiabilidade a uma gama alargada de configurações

alternativas de estrutura e de agitação. Algumas das suas limitações estão relacionadas com o tempo elevado de cálculo e com a necessidade de calibração de alguns parâmetros de cálculo; outras limitações dizem respeito à representação de certas características estruturais, como a porosidade (Reis *et al.*, 2009).

A modelação física continua a ser o método mais fiável de determinar o galgamento, sendo os seus resultados utilizados em estudos de protótipo e no desenvolvimento, calibração e validação dos outros métodos de cálculo do galgamento. Contudo, a modelação física é dispendiosa, morosa, exige infra-estruturas e equipamento muito específico e requer uma elevada experiência de quem realiza os ensaios e analisa os seus resultados. No caso de ensaios em modelo físico, reveste-se da maior importância o conhecimento dos efeitos de escala e de modelo que podem ocorrer. Resultados de protótipo e de ensaios em modelo físico a grandes escalas são muito raros e só ultimamente foram efectuados vários estudos para preencher esta lacuna (Franco *et al.*, 2004; Geeraerts e Boone, 2004; Geeraerts e Willems, 2004; Hordijk, 2004; Kortenhuis *et al.*, 2004a; Pullen e Allsop, 2004a, 2004b) e permitir uma investigação desses efeitos (Kortenhuis *et al.*, 2004b, 2005; De Rouck *et al.*, 2005).

1.2. Objectivos e Metodologia

Os objectivos gerais do presente trabalho centraram-se no estudo do fenómeno do galgamento em estruturas marítimas utilizando diversas metodologias e na análise e quantificação do galgamento para um caso de estudo da costa portuguesa.

Os objectivos específicos foram os seguintes:

- Efectuar uma revisão bibliográfica da literatura de referência e uma revisão crítica no que se refere a ferramentas de cálculo de galgamento;
- Realizar ensaios em modelo físico reduzido no Pavilhão de Hidráulica Marítima do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para a determinação do galgamento no quebra-mar de protecção do Porto de Rabo de Peixe (São Miguel, Açores), estrutura em talude e com muro-cortina do lado exterior;

- Proceder à aplicação das ferramentas empíricas para o cálculo do galgamento recomendadas no actual manual dos galgamentos (Pullen *et al.*, 2007) para o quebra-mar em estudo, isto é, fórmulas empíricas e uma ferramenta que resulta da análise de redes neuronais artificiais;
- Comparar os valores do caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura obtidos através da aplicação das ferramentas empíricas com os dados dos ensaios em laboratório;
- Analisar os resultados e avaliar as vantagens e as limitações da aplicação dos diferentes métodos de avaliação do galgamento.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, a que se acrescentam as referências bibliográficas e anexo. Neste **Capítulo 1** faz-se a definição do objecto de estudo, o seu enquadramento e relevância.

No **Capítulo 2** apresenta-se a caracterização do fenómeno do galgamento de estruturas marítimas nas suas várias vertentes, bem como os factores condicionantes do mesmo.

No **Capítulo 3** discutem-se metodologias de avaliação do galgamento, incluindo os seus limites de aplicabilidade, em particular a modelação física e ferramentas de carácter empírico recomendadas no actual manual dos galgamentos (Pullen *et al.*, 2007) para o perfil em estudo: fórmulas empíricas e uma ferramenta baseada na análise de redes neuronais artificiais.

O **Capítulo 4** introduz o caso de estudo, realçando as especificidades próprias da obra em causa. Seguidamente descreve-se os ensaios em modelo físico realizados no âmbito da ampliação do porto em questão e que avaliaram, entre outros aspectos, o impacto no galgamento do alteamento do muro-cortina do quebra-mar existente actualmente no porto. Apresentam-se ainda os resultados obtidos por aplicação das ferramentas empíricas descritas no Capítulo 3. Por fim, faz-se uma análise e comparação dos resultados provenientes das diferentes metodologias de avaliação do galgamento.

No **Capítulo 5** sistematizam-se os resultados obtidos no âmbito deste trabalho e apresentam-se as suas principais conclusões.

2. CARACTERIZAÇÃO DO GALGAMENTO

2.1. Considerações Gerais

No dimensionamento de estruturas marítimas procura-se o equilíbrio entre a satisfação dos requisitos estruturais e funcionais da obra a construir, a eliminação de gastos supérfluos e a ocorrência de impactos indesejáveis no meio envolvente. Um elemento importante para alcançar este equilíbrio é a escolha da altura de coroamento da estrutura acima do nível de repouso da superfície livre (NR), R_c , que limite a valores admissíveis o galgamento (Figura 2).

O galgamento pode ser quantificado através do volume, V (em m^3), da massa de água que galga a estrutura ou através do caudal médio, q (em m^3/s por metro de desenvolvimento de estrutura ou em l/s por metro de desenvolvimento de estrutura), que passa sobre o coroamento da estrutura. As variáveis determinantes na escolha da altura de coroamento da estrutura, por influírem directamente no galgamento sobre ela, são o ângulo do talude exterior com a horizontal, α , o nível de repouso da superfície livre, NR, e as características da agitação marítima incidente na estrutura (Figura 2).

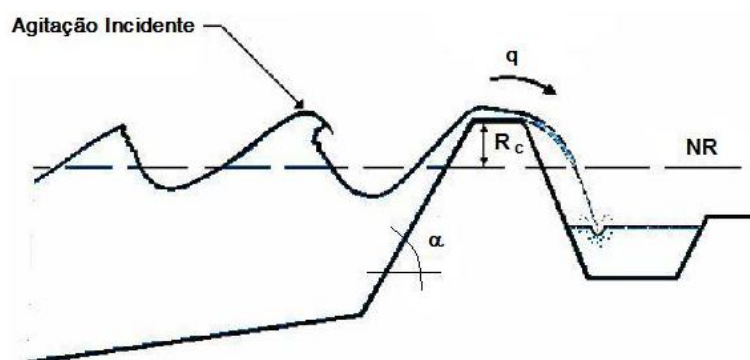


Figura 2 - Representação esquemática do fenómeno do galgamento (Brito, 2007)

O galgamento de uma estrutura marítima, que se define normalmente como a transposição da mesma por água, está intrinsecamente ligado ao fenómeno do espraçamento, R_u , que é a cota máxima atingida por uma onda ao interagir com a estrutura marítima, localizada a uma profundidade h . A cota é medida na vertical e tem por referência o nível de repouso da superfície livre (Figura 3). Na literatura Anglo-Saxónica empregam-se os termos “Run-Up Height” ou “Run-Up”.

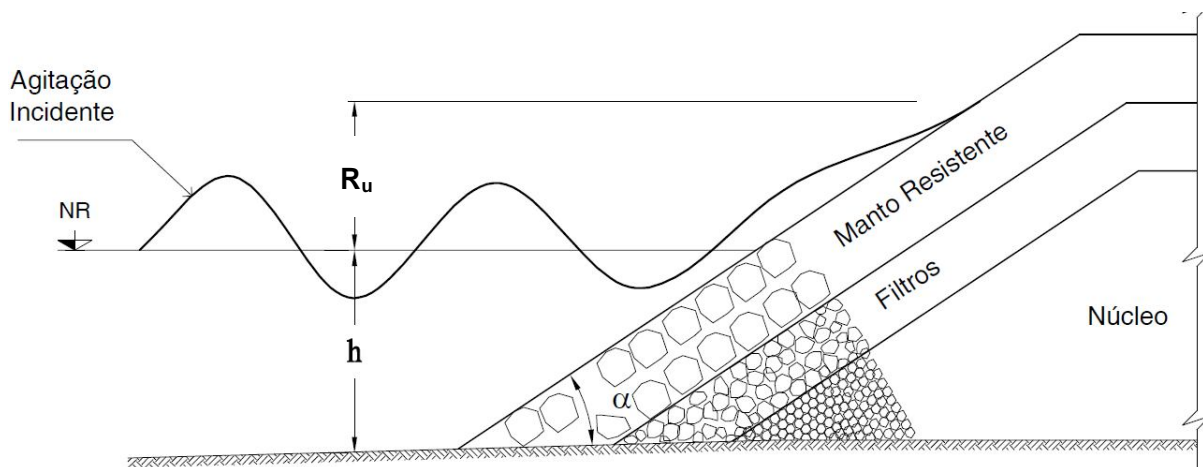


Figura 3 - Espraio de onda sobre talude

Se o espraio for grande e se desenvolver uma lâmina contínua de água que excede a cota de coroamento, então os galgamentos serão significativos e verifica-se um galgamento designado por “green water”. Se o espraio se mantém abaixo da cota de coroamento da estrutura, não ocorrerão galgamentos de lâminas de água, embora, por acção do vento, possam ocorrer galgamentos sob a forma de borrifos (“spray”). Outra forma de galgamento é aquela que ocorre quando a onda rebenta sobre a parede exterior da obra e origina um grande volume de salpicos que passa sobre a estrutura (“splash”).

É de salientar que a geometria da estrutura influencia a quantidade de água que galga, pois consoante as suas características estruturais (e.g. inclinação do talude, tipo de blocos de protecção e existência ou não de muro-cortina) obtém-se um maior ou menor grau de galgamento.

Os limites admissíveis de galgamento para evitar diferentes tipos de danos estão estabelecidos em bibliografia de referência e influenciam naturalmente o custo, a eficiência e o impacto estético-visual da obra. Para preservar pessoas, veículos, edifícios, barcos, equipamentos e até mesmo a própria estrutura marítima galgada, o manual Europeu dos galgamentos (Pullen *et al.*, 2007) prevê valores máximos admissíveis de caudais médios galgados por metro de desenvolvimento de estrutura, q , para diferentes tipos de danos (Tabela 1).

Merecedora de destaque na Tabela 1 é a gama crítica de valores de q , que vai desde valores tão pequenos como 0.01 l/s/m (para veículos) até 200 l/s/m (para a estrutura galgada).

Tabela 1 - Valores críticos do caudal médio de galgamentos (adaptado de Pullen *et al.*, 2007)

Condições e Tipo de Danos		Caudal médio q (l/s/m)
Estruturas de Defesa com Talude no Tardoz	Sem danos se o coroamento e o tardoz estiverem bem protegidos	50 - 200
	Sem danos no coroamento e no tardoz de um dique de argila coberto por relva	1 - 10
	Sem danos no coroamento e no tardoz mesmo se não estiverem protegidos	0.1
Defesas Frontais	Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal	200
	Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas	50
Pessoas	Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com percepção de que se pode molhar, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jactos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar	1 - 10
	Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga ⁽¹⁾	0.1
Veículos	Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura (<i>pulsating overtopping</i>), sem jactos de água a cair na via, veículo não imerso	10 - 50 ⁽²⁾
	Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projectado com grande velocidade (<i>impulsive overtopping</i>) ou com jactos de água a cair na via que podem imergir o veículo	0.01 - 0.05 ⁽³⁾
Barcos, Edifícios e Equipamento	Danos significativos ou afundamento de grandes barcos	50
	Afundamento de barcos pequenos localizados a 5-10 m da estrutura	10 ⁽⁴⁾
	Danos em grandes barcos	
	Danos em edifícios	1 ⁽⁵⁾
	Danos em equipamento localizado a 5-10 m da estrutura	0.4 ⁽⁴⁾

(1) Estas condições não têm que se verificar todas em simultâneo.

(2) Estes limites estão relacionados com o galgamento efectivo obtido na via de circulação.

(3) Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima, mas é assumido que a via de circulação se encontra imediatamente atrás da estrutura.

(4) Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima.

(5) Estes limites estão relacionados com o galgamento efectivo obtido no edifício.

Note-se que para garantir a segurança de pessoas que se encontram na vizinhança da estrutura marítima, Pullen *et al.* (2007) referem ainda uma taxa crítica mais severa de $q=0.03$ l/s/m, mas apenas para casos especiais de pessoas totalmente desprevenidas, que não conseguem visualizar a agitação incidente, que podem facilmente ficar perturbadas ou assustadas, que não estão vestidas de forma apropriada para se molharem, que se desloquem numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.

2.2. Factores Condicionantes

2.2.1. Agitação Marítima

O principal agente e factor condicionante do galgamento é a agitação marítima, que é caracterizada por parâmetros como a altura da onda, H , o período, T e a direcção de propagação, θ .

A influência do período é representada, indirectamente, através da declividade da onda, S , que relaciona a altura de onda com o comprimento de onda, L . Esta declividade é determinada para a altura de onda local, junto à estrutura e, habitualmente, o valor usado é a altura de onda significativa, H_{m0} , calculada com o momento de ordem zero do espectro, m_0 . O comprimento de onda é referido ao largo e pode ser calculado com o período médio, T_m (L_{om}), ou de pico, T_p (L_{op}), obtidas de acordo com as equações 2.1 e 2.2. É possível assim, obter uma declividade S_{om} ou S_{op} de acordo com as equações 2.3 e 2.4, respectivamente:

$$L_{om} = \frac{gT_m^2}{2\pi} \quad (2.1)$$

$$L_{op} = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (2.2)$$

$$S_{om} = \frac{H_{m0}}{L_{om}} \quad (2.3)$$

$$S_{op} = \frac{H_{m0}}{L_{op}} \quad (2.4)$$

em que:

- g - aceleração da gravidade;
- H_{m0} - altura de onda significativa;
- L_{om} - comprimento de onda ao largo, calculado com o período médio (T_m);
- L_{op} - comprimento de onda ao largo, calculado com o período de pico (T_p);
- S_{om} - declividade da onda calculada com L_{om} ;
- S_{op} - declividade da onda calculada com L_{op} ;
- T_m - período médio das ondas de um registo;
- T_p - período de pico do espectro;
- π - constante de Arquimedes.

Para além do período e da altura de onda, é necessário avaliar a forma como a onda rebenta sobre a estrutura, pois esta influencia fortemente o tipo de galgamento. A acção da onda sobre a estrutura, assim como alguns dos seus efeitos, é representada pelo número de Iribarren, ξ_o , que relaciona a inclinação do talude com a horizontal, α , com a declividade da onda e consoante se utilize S_{om} ou S_{op} obtem-se ξ_{om} ou ξ_{op} , de acordo com as equações 2.5 e 2.6, respectivamente:

$$\xi_{om} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S_{om}}} \quad (2.5)$$

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S_{op}}} \quad (2.6)$$

em que:

- ξ_{om} - número de Iribarren, correspondente ao período médio para ondas irregulares calculado com S_{om} ;
- ξ_{op} - número de Iribarren, correspondente ao período de pico para ondas irregulares calculado com S_{op} ;
- α - ângulo de talude com a horizontal.

Para valores do número de Iribarren inferiores a 0.5, a rebentação da onda é *progressiva*, ou seja, a crista deforma-se e destabiliza-se, criando uma leve espuma sobre o talude. Este tipo de rebentação ocorre frequentemente em declives suaves, Figura 4.

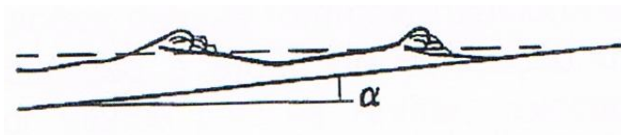


Figura 4 - Rebentação da onda do tipo progressivo (USACE, 2006)

Quando a crista da onda cria uma curvatura e cai sobre o talude originando grandes salpicos, a rebentação diz-se *mergulhante* e corresponde a valores do número de Iribarren entre 0.5 e 3, Figura 5.



Figura 5 - Rebentação da onda do tipo mergulhante (USACE, 2006)

Pode ainda surgir o cruzamento entre os dois tipos de rebentação referidos anteriormente, onde a crista não rebenta inteiramente, não origina grandes salpicos, mas cria-se uma espuma que se estende pelo talude. Este tipo de rebentação corresponde a valores do número de Iribarren de aproximadamente 3 a 3.5 e diz-se que é *colapsante*, Figura 6.

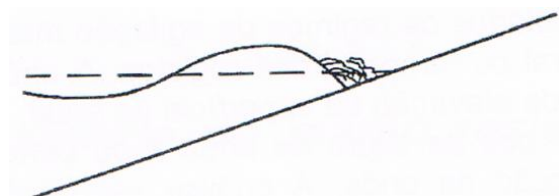


Figura 6 - Rebentação da onda do tipo colapsante (USACE, 2006)

Quando a onda apresenta pouca declividade, ou seja, elevado número de Iribarren (superior a 3.5), esta deforma-se e espraia sobre o talude, avançando sem rebentar. Estas ondas apresentam rebentação de *fundo* e uma forte reflexão, Figura 7.



Figura 7 - Rebentação da onda do tipo de fundo (USACE, 2006)

O número de Iribarren não tem em conta o ângulo de incidência das ondas, β , que é medido pelo ângulo entre a direcção de propagação das ondas e a direcção perpendicular à estrutura, ver Figura 8.

Às ondas com incidência normal à estrutura corresponde um valor de $\beta=0^\circ$. O ângulo de incidência das ondas influencia o fenómeno do galgamento, na medida em que, em geral, quanto maior for o ângulo, menor será o galgamento. A maior parte das expressões empíricas existentes, resultantes de testes bidimensionais, são aplicáveis apenas a ondas de incidência normal à estrutura.

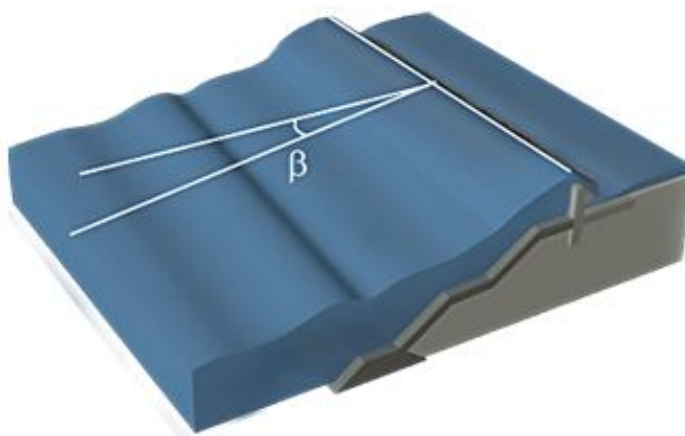


Figura 8 - Ângulo entre a direcção de propagação da agitação e a normal à estrutura (β)

2.2.2.Nível de Água

Os níveis de água que normalmente são estudados para uma estrutura marítima e que podem influenciar o galgamento são Baixa-mar (BM), Preia-mar (PM) e Preia-mar com sobrelevação meteorológica (PM+S).

O nível de água condiciona fortemente o galgamento, sendo, em geral, mais crítico nas situações em que é mais elevado e quando se associa com situações de tempestade.

A onda que atinge uma estrutura em talude espraia-se pelo talude, dissipando parte da sua energia. Em preia-mar, a distância entre o nível de repouso e a cota de coroamento é menor do que em condições de baixa-mar. O facto de haver uma menor área de talude emersa, leva a que possa haver uma maior probabilidade de ocorrência de galgamentos, uma vez que grande parte da energia não é dissipada no espraio. Assim, em geral, quanto maior for o nível de água, maiores serão os galgamentos, especialmente em caso de tempestades. Nestas situações o vento é também um factor de grande importância, pois pode originar sobrelevações do nível de água devidas a situações meteorológicas adversas (vento e pressão atmosférica).

2.2.3.Geometria da Estrutura

A geometria da estrutura é um factor determinante para o galgamento e é através dela que existe a possibilidade de controlar e reduzir o galgamento.

Tal como referido anteriormente, na definição da geometria da estrutura, um parâmetro relevante é a diferença entre a altura de coroamento da estrutura, acima do nível de repouso da superfície livre, R_c , (Figura 9), pois quanto maior for esta altura, menor será a probabilidade de haver galgamento.

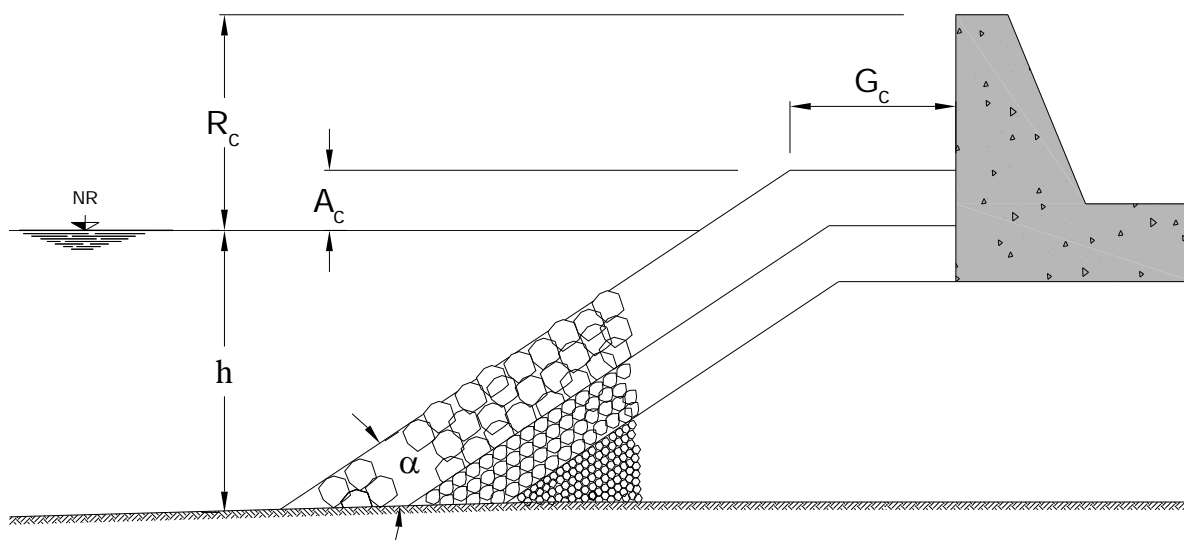


Figura 9 - Representação esquemática de alguns parâmetros que definem a geometria da estrutura e que influenciam o galgamento

Na Figura 9, os parâmetros indicados são:

- A_c - distância entre o nível de repouso e a berma de coroamento da estrutura;
- G_c - largura da berma de coroamento da estrutura;
- h - profundidade em frente à estrutura;
- NR - nível de repouso da superfície livre;
- R_c - altura de coroamento da parte impermeável da estrutura acima do nível de repouso;
- α - ângulo de talude com a horizontal.

O galgamento pode também ser reduzido por dissipação da energia das ondas incidentes. A dissipação de energia pode ser conseguida através da rugosidade e da permeabilidade do talude, da existência de uma eventual berma de coroamento e da configuração da superestrutura (Figura 9).

A rugosidade e a permeabilidade são características dadas pelo tipo de material que constitui o manto de protecção exterior da estrutura e pela forma de colocação dos blocos. Não existe nenhum critério específico para a utilização de cada tipo de material. No entanto, distinguem-se os blocos de betão, que podem ter diversas formas, e os blocos de enrocamento.

A existência de uma berma de coroamento é uma solução bastante usada para redução do galgamento. A berma é caracterizada pela altura a que se encontra

acima do nível de repouso, A_c , e pela sua largura, G_c (Figura 9). Esta tem grande influência nos galgamentos, pois quanto maior for e quanto mais acima estiver do nível de repouso, mais energia dissipa e conseqüentemente menor é o galgamento.

Em situações de agitação mais violenta, pode adoptar-se uma superestrutura, que poderá ter configuração vertical (Figura 9) ou curva (deflector de ondas), permitindo, esta última, o retorno da onda incidente e conseqüentemente uma maior dissipação.

O ângulo de inclinação do talude, α (Figura 9), é também um parâmetro que influencia fortemente o galgamento. A influência deste factor está representada no número de Iribarren, já referido, que relaciona a geometria do talude com a geometria da onda.

3. MODELAÇÃO FÍSICA E MÉTODOS DE CÁLCULO

3.1. Introdução

O galgamento de uma estrutura marítima é um fenómeno complexo e difícil de quantificar, sendo de extrema importância a experiência acumulada dos projectistas para a concepção de estruturas que causem pouco impacto ambiental e visual, que sejam económicas e que sejam eficientes em dissipar a energia das ondas e em diminuir ou impedir o galgamento. Como tal, vários métodos de cálculo foram surgindo ao longo dos anos, com diferentes graus de complexidade e de rapidez de aplicação.

Actualmente, o dimensionamento de quebra-mares no que diz respeito ao galgamento é normalmente realizado com base em expressões empíricas (e.g. Van der Meer *et al.*, 1998; Besley, 1999; Pullen *et al.*, 2007) ou semi-empíricas (e.g. Hedges e Reis, 1998, 2004; Reis *et al.*, 2008).

Expressões empíricas são simples ajuste de curvas a dados de modelos físicos, usando o método dos mínimos quadrados ou outros métodos de ajuste, enquanto que expressões semi-empíricas são deduzidas a partir de considerações teóricas e calibradas com base em resultados de ensaios em modelo físico.

A aplicação directa destas expressões é válida apenas para as condições específicas que foram contempladas nos ensaios de base no que diz respeito à agitação marítima, ao nível de maré e às configurações, relativamente simples, das estruturas. Como salientado anteriormente, os casos práticos de Engenharia procuram estruturas com configurações que causem pouco impacto visual e ambiental, mas cada vez mais complexas e inusitadas, que não foram contempladas no desenvolvimento dessas expressões.

Outro tipo de ferramentas empíricas que recentemente têm ganho um papel importante na determinação do galgamento são as redes neuronais artificiais, (e.g. Wedge *et al.*, 2005; Mase *et al.*, 2007). A ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING2, baseada na análise de 700 redes neuronais e desenvolvida no âmbito do Programa Europeu CLASH, muito tem contribuído para tal (Medina *et*

al., 2002, 2005; Coeveld *et al.*, 2005; Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005). No entanto, Coeveld *et al.* (2005) recomendam que em fase de Projecto de Execução, a fiabilidade dos resultados da NN_OVERTOPPING2 deve ser verificada através de modelação física específica para as condições de agitação e geometria da estrutura em questão. Como tal, este método tem ainda também aplicação limitada à fase de Estudo Prévio.

Devido à melhoria dos meios de cálculo e ao desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais potentes, o uso deste tipo de modelos começa a tornar-se cada vez mais atractivo. Actualmente, embora ainda não existam modelos numéricos que sejam simultaneamente precisos e eficientes do ponto de vista computacional, os diversos tipos de modelos disponíveis reúnem, cada um, parte destes requisitos.

Entre os modelos existentes podem destacar-se os baseados nas equações NLSW (*Non-Linear Shallow-Water*) (Van Gent, 1994; Dodd, 1998; Hu, 2000; Hu *et al.*, 2000; Clarke *et al.*, 2004; Hu e Meyer, 2005; Reis *et al.*, 2009), os modelos VOF (*Volume Of Fluid*) (Lin e Liu, 1998; Kortenhaus *et al.*, 2005; Lara *et al.*, 2006; Losada *et al.*, 2008), os modelos SC (*Surface Capturing*) (Ingram *et al.*, 2002, 2004) e os modelos SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) (Shao *et al.*, 2006; Dalrymple e Rogers, 2006; Didier e Neves, 2009).

Os modelos mais simples (NLSW), apesar das suas limitações essencialmente relacionadas com as equações de base, têm como grande vantagem a rapidez de cálculo. Apesar dos modelos mais recentes (VOF, SC e SPH) serem mais completos, a sua aplicação em casos práticos de engenharia tem ainda algumas limitações, apesar de serem mais flexíveis que as fórmulas ou os modelos físicos, já que uma vez calibrados e validados, podem ser configurados e aplicados com fiabilidade a uma gama alargada de configurações alternativas de estrutura e de agitação.

Algumas das limitações estão relacionadas com o tempo elevado de cálculo e com a necessidade de calibração de cada caso de estudo; outras limitações dizem

respeito à representação de certas características estruturais, tais como a porosidade (Neves *et al.*, 2008).

Assim, os ensaios em modelo físico continuam a ser o método mais fiável de determinar o galgamento, sendo os seus resultados utilizados em estudos de protótipo e no desenvolvimento, calibração e validação dos outros métodos de cálculo do galgamento. São, assim, um dos métodos mais importantes de apoio ao projecto de estruturas marítimas e são fundamentais para o dimensionamento das mesmas, especialmente quando se trata de obras de grande dimensão e/ou importância económica.

Os ensaios permitem validar e otimizar soluções desenvolvidas no projecto, aproximando o nível de galgamentos medido do que se considera aceitável, evitando o subdimensionamento ou o sobredimensionamento da estrutura. São utilizados essencialmente na fase de Projecto de Execução e são apenas estudadas algumas soluções alternativas seleccionadas, já que a modelação física é dispendiosa, morosa, exige infra-estruturas e equipamento específicos e requer elevada experiência e conhecimento de quem realiza os ensaios e analisa os resultados.

3.2. Modelação Física

3.2.1. Semelhança entre o Modelo e o Protótipo

A extrapolação do comportamento do modelo físico para o protótipo não é directa, já que existem limitações no modelo devido à dificuldade de simular e medir a uma dada escala todos os fenómenos existentes no protótipo e à dificuldade de representar fielmente a estrutura real.

As diferenças resultantes do facto de se reproduzir o modelo a uma escala diferente da realidade designam-se por efeitos de escala e as diferenças resultantes das limitações da tecnologia de construção e exploração do modelo designam-se por efeitos do modelo. Existem ainda, os efeitos de medição que, tal como o nome indica, são resultantes das limitações das técnicas de medição.

Assim, reveste-se da maior importância o conhecimento destes efeitos, para poder avaliar os aspectos em que o modelo traduz a realidade e aqueles em que dela se afasta. Resultados de protótipo e de ensaios em modelo físico a grandes escalas são muito raros e só na última década foram efectuados vários estudos para preencher esta lacuna (Franco *et al.*, 2004; Geeraerts e Boone, 2004; Geeraerts e Willems, 2004; Hordijk, 2004; Kortenhuis *et al.*, 2004a; Pullen e Allsop, 2004a, 2004b) e permitir uma investigação desses efeitos (Kortenhuis *et al.*, 2004b, 2005; De Rouck *et al.*, 2005).

3.2.2. Teoria da Semelhança

O estudo de um problema com base em modelos físicos reduzidos requer a aplicação de leis de escala, de modo a transformar as acções reais em acções equivalentes a aplicar ao modelo e a extrapolar os resultados experimentais obtidos para a escala real, ou seja, o modelo e o protótipo devem comportar-se de forma tão semelhante quanto possível, pelo menos no que se refere aos principais fenómenos a reproduzir.

Segundo Pita (1984), para se verificar semelhança mecânica hidráulica é necessário que sejam semelhantes a geometria, as solicitações e os seus efeitos no modelo e no protótipo, isto é, é necessário que se verifiquem semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica.

O modelo e o protótipo são geometricamente semelhantes sempre que a razão das distâncias entre quaisquer pontos homólogos do modelo e do protótipo tenha o mesmo valor à escala geométrica em que está construído o modelo, N_L .

O modelo e o protótipo são cinematicamente semelhantes sempre que a razão entre os intervalos de tempo em que partículas do modelo e do protótipo se deslocam entre pontos homólogos tenha o mesmo valor à escala cinemática, N_T .

O modelo e o protótipo são dinamicamente semelhantes sempre que a razão entre as forças actuantes em partículas homólogas do modelo e do protótipo tenha o mesmo valor à escala das forças, N_F .

Note-se que um pequeno erro no modelo físico pode eventualmente corresponder a um erro significativo no protótipo, em função da escala utilizada.

Os parâmetros adimensionais do modelo e do protótipo deverão ser iguais para que se verifique semelhança mecânica hidráulica. Os fenómenos de interacção onda-estrutura a que estes parâmetros adimensionais estão associados estão indicados na Figura 10 e são descritos em detalhe em Führböter (1986).

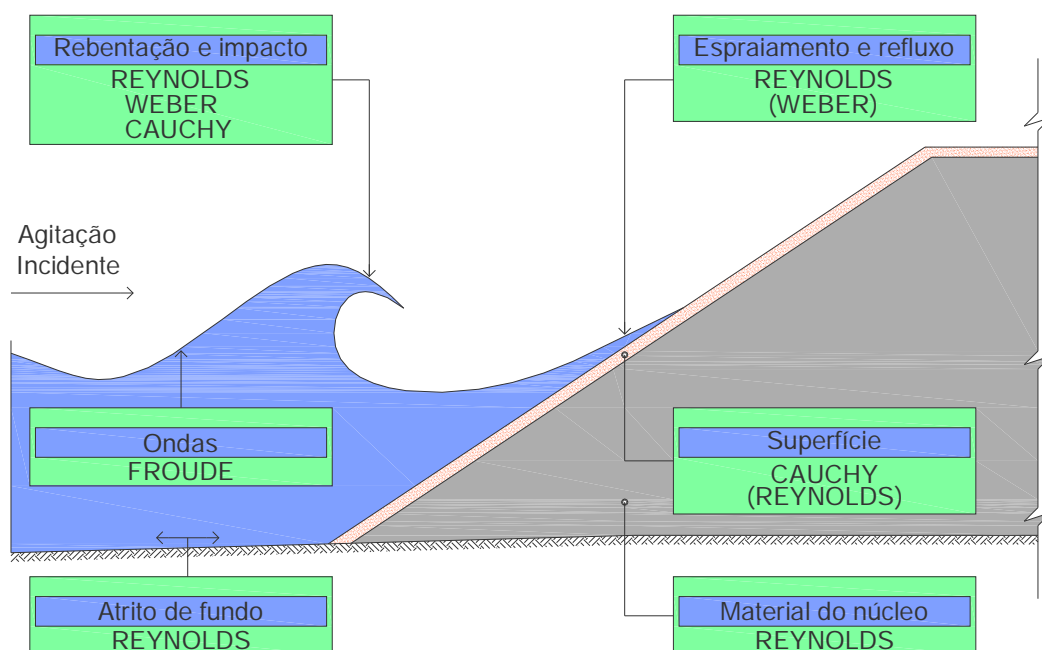


Figura 10 - Fenómenos e efeitos de escala na modelação das forças, das ondas e na resposta da estrutura marítima (adaptado de Führböter, 1986)

3.2.3.Efeitos de Escala

Por ser impossível a reprodução completa dos fenómenos de interacção onda-estrutura em laboratório, bem como obter simultaneamente todos os parâmetros adimensionais iguais no modelo e no protótipo, existem efeitos de escala.

Na Tabela 2 apresenta-se um resumo das escalas dos vários parâmetros considerados nos modelos físicos segundo as semelhanças de Froude, de Cauchy, de Weber e de Reynolds.

Tabela 2 - Resumo dos métodos de escala (Kortenhaus *et al.*, 2005)

Parâmetro	Unid.	Froude	Cauchy	Weber	Reynolds
Relação das Forças	(-)	Inércia /Gravidade	Inércia/Elasticidade	Inércia/Tensão de Superfície	Inércia/Viscosidade
Equações	(-)	$\frac{u}{\sqrt{gL}} = \text{const.}$	$\frac{\rho u^2}{k} = \text{const.}$	$\frac{\rho L u^2}{\chi} = \text{const.}$	$\frac{u L}{\nu} = \text{const.}$
Comprimento	(m)	N_L	N_L	N_L	N_L
Área	(m ²)	$N_A = N_L^2$	$N_A = N_L^2$	$N_A = N_L^2$	$N_A = N_L^2$
Volume	(m ³)	$N_v = N_L^3$	$N_v = N_L^3$	$N_v = N_L^3$	$N_v = N_L^3$
Tempo	(s)	$N_t = \sqrt{N_L}$	$N_t = \sqrt{\frac{N_\rho}{N_k}} N_L$	$N_t = \sqrt{\frac{N_\rho}{N_\chi}} N_L^{1.5}$	$N_t = \frac{N_L^2}{N_v}$
Velocidade	(m/s)	$N_u = \sqrt{N_L}$	$N_u = \sqrt{\frac{N_k}{N_\rho}}$	$N_u = \sqrt{\frac{N_\chi}{N_\rho N_L}}$	$N_u = \frac{N_v}{N_L}$
Aceleração	(m/s ²)	$N_{ac} = 1$	$N_{ac} = \frac{N_k}{N_\rho N_L}$	$N_{ac} = \frac{N_\chi}{N_\rho N_L^2}$	$N_{ac} = \frac{N_v^2}{N_L^3}$
Massa	(kg)	$N_m = N_\rho N_L^3$	$N_m = N_\rho N_L^3$	$N_m = N_\rho N_L^3$	$N_m = N_\rho N_L^3$
Pressão	(Pa)	$N_p = N_\rho N_L$	$N_p = N_k$	$N_p = \frac{N_\chi}{N_L}$	$N_p = N_\rho \frac{N_v^2}{N_L^2}$
Força	(N)	$N_F = N_\rho N_L^3$	$N_F = N_k N_L^2$	$N_F = N_\chi N_L$	$N_F = N_\rho N_v^2$
Caudais	(m ³ /s/m)	$N_q = N_L^{1.5}$	$N_q = \sqrt{\frac{N_k}{N_\rho}} N_L$	$N_q = \sqrt{\frac{N_\chi}{N_\rho}} N_L$	$N_q = N_v$

Na Tabela 2, os parâmetros indicados significam:

- ν - viscosidade cinemática do fluido;
- ρ - massa volúmica do fluido;
- k - compressibilidade do fluido;
- χ - tensão superficial do fluido;
- N - relação entre as medidas no protótipo e as medidas no modelo;
- N_p - escala de pressão;
- N_q - escala do caudal;
- N_t - escala de tempo;
- N_u - escala de velocidade;
- N_v - escala de volume;
- N_A - escala de área;

- N_F - escala de força;
- N_L - escala geométrica;
- N_T - escala cinemática;
- N_ρ - escala de massa volúmica;
- N_ν - escala de viscosidade cinemática;
- N_γ - escala de tensão superficial;
- N_{ac} - escala de aceleração;
- N_K - escala de compressibilidade;
- N_m - escala de massa.

O parâmetro mais relevante do modelo deriva da determinação da relação entre as dimensões no protótipo e no modelo.

Nos estudos em modelo de fenómenos da interacção onda-estrutura, os problemas dos efeitos de escala surgem da incompatibilidade entre as escalas correspondentes às semelhanças de Froude, Reynolds, Weber e Cauchy.

Para os modelos de estruturas marítimas como os que são objecto deste trabalho e para escalas geométricas exequíveis em laboratório, não é possível, do ponto de vista prático, conseguir a verificação simultânea da igualdade dos números de Froude e de Reynolds. Estes são os parâmetros mais importantes, mas os números de Cauchy e Weber, influenciam igualmente o comportamento dos quebra-mares e também não são possíveis reproduzir simultaneamente com o número de Froude.

A gravidade e a pressão são forças importantes para o modelo de estabilidade e galgamento das obras marítimas sendo, por isso, as escalas dos modelos estabelecidas de acordo com a lei de Froude. Consequentemente, considera-se que as forças de viscosidade (lei de Reynolds), efeitos de elasticidade (lei de Cauchy) e as forças de tensão superficial (lei de Weber) são insignificantes no modelo e no protótipo. O erro que resulta de desprezar estas forças traduz-se nos efeitos de escala.

Em relação à lei de Reynolds, os resultados das investigações efectuadas por Hudson *et al.* (1979), permitiram concluir que para assegurar o regime turbulento do

escoamento no manto de um quebra-mar no modelo, o número de Reynolds deve ser aproximadamente 3×10^4 . Segundo Hughes (1993), para números de Reynolds superiores a 1×10^4 os escoamentos são considerados turbulentos e o efeito de escala, devido a não considerar a semelhança de Reynolds, é desprezável.

No que se refere à lei de Weber, Wolters (2007) refere que a tensão superficial das ondas é geralmente insignificante no protótipo e por esse motivo se o modelo não for muito pequeno (comprimentos de onda superiores a 0.02 m, ondas com períodos superiores a 0.35 s e profundidades superiores a 0.02 m), o efeito de escala devido a não se considerar a semelhança de Weber é desprezado.

Ocorrem também efeitos de escala na simulação da rebentação das ondas e dos seus efeitos pelo facto de na emulsão ar-água não existir semelhança, por a compressibilidade do ar não estar simulada à escala.

3.2.4.Efeitos de Modelo

Os efeitos de modelo têm origem na reprodução incorrecta de algumas características do protótipo, tais como a geometria da estrutura, resistência mecânica dos blocos artificiais e características das ondas e das correntes, devido às condições de fronteira do modelo. De facto tem havido um desenvolvimento significativo das técnicas de modelação física, mas não se conseguem evitar as influências do modelo e da instalação nos resultados obtidos no modelo hidráulico.

Existem efeitos de modelo que não permitem reproduzir correctamente os fenómenos associados à reflexão, transmissão e dissipação de energia por não reproduzir correctamente as fronteiras do modelo. A não reprodução da permeabilidade dos filtros e do núcleo é um efeito de modelo, o qual tem influência na estabilidade do manto e no galgamento.

Outro aspecto a considerar nos efeitos de modelo é a não reprodução à escala da resistência mecânica dos materiais constituintes dos blocos. No modelo, os blocos têm uma resistência superior à do protótipo, pelo que não se verificam fissuras e roturas resultantes do choque entre eles ou de quedas.

As razões que levam à escolha de uma determinada escala geométrica prendem-se com as características da agitação a reproduzir (altura e período das ondas), com as características da obra (profundidade, cota de coroamento, inclinação do talude, peso dos blocos) e com as características da instalação (área disponível, profundidade máxima possível, altura e períodos máximos das ondas que são possíveis gerar). As escalas apropriadas para modelos físicos tridimensionais de obras marítimas deverão, segundo Wolters (2007), estar compreendidas entre 1:25 e 1:75.

Um outro efeito de modelo advém da dificuldade em reproduzir a mesma densidade e modo de colocação dos blocos no protótipo e no modelo.

3.2.5.Efeitos de Medição

Os efeitos de medição resultam dos equipamentos utilizados na recolha de dados no modelo. É importante quantificar as diferenças entre o modelo e o protótipo devidas às técnicas de medição utilizadas. Os efeitos de medição resultam muitas vezes de:

- diferentes calibrações dos equipamentos de medição (sondas, etc.);
- da utilização de diferentes sistemas de medição (os quais devem ser testados e comparados).

Estes efeitos podem ter uma influência significativa quando se comparam os resultados entre dois modelos idênticos desenvolvidos em diferentes instalações experimentais.

3.3.Expressões Empíricas

O caudal médio galgado, tal como referido anteriormente, pode ser estimado através de expressões empíricas (ou semi-empíricas). As expressões empíricas resultam de interpolações feitas a resultados obtidos em ensaios em modelo reduzido, para estruturas com geometria específica e para determinadas condições de agitação e de nível de mar. Têm a vantagem de ser um método rápido e económico, no entanto limitado a um número restrito de configurações simplificadas

e de condições de ensaio. A sua aplicação a outro tipo de configurações/condições hidrodinâmicas requer extrapolações, o que, por vezes, leva a uma discrepância de resultados.

As expressões do caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura, q , dependem de alguns dos parâmetros que condicionam o fenómeno do galgamento, nomeadamente, os relacionados com o clima de agitação e a geometria da estrutura:

$$q = f(H_s; T_m; \beta; h; R_c; A_c; \alpha; g; \gamma_f; \gamma_b; \gamma_h; \dots) \quad (3.1)$$

em que:

- q - caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura;
- H_s - altura de onda significativa;
- T_m - período médio das ondas de um registo;
- β - ângulo de incidência da onda;
- h - profundidade em frente à estrutura;
- R_c - altura de coroamento da parte impermeável da estrutura acima do nível de repouso;
- A_c - distância entre o nível de repouso e a berma de coroamento da estrutura;
- α - ângulo do talude com a horizontal;
- g - aceleração da gravidade;
- γ_f - coeficiente de redução do galgamento devido à rugosidade/permeabilidade da estrutura;
- γ_b - coeficiente de redução do galgamento devido à presença de uma berma na estrutura;
- γ_h - coeficiente de redução do galgamento devido ao efeito de baixas profundidades em frente à estrutura.

Em geral, o caudal médio galgado é expresso de uma de duas formas adimensionais (Reis, 1998), de acordo com as equações 3.2 e 3.3:

$$Q = a \exp(-bR) \quad (3.2)$$

$$Q = aR^{(-b)} \quad (3.3)$$

em que:

- a,b - coeficientes empíricos, fornecidos em tabelas, e que variam consoante a fórmula em questão, isto é, são função da geometria da estrutura e das condições de agitação e nível ensaiadas;
- Q,R - valores adimensionalizados do caudal médio galgado e da distância entre o nível de repouso e a cota de coroamento da estrutura, respectivamente.

Embora existam várias formulações empíricas que permitem prever o galgamento, utilizou-se no âmbito deste trabalho a ferramenta de cálculo empírica construída no âmbito do programa Europeu CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full-Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping), disponível online no site: http://www.overtopping-manual.com/calculation_tool.html. Esta ferramenta, de fácil e rápida utilização, dispõe de várias representações gráficas dos tipos de estrutura e geometria das secções transversais às quais se podem aplicar formulações empíricas, que permitem ao utilizador seleccionar o seu caso de estudo (Figura 11).

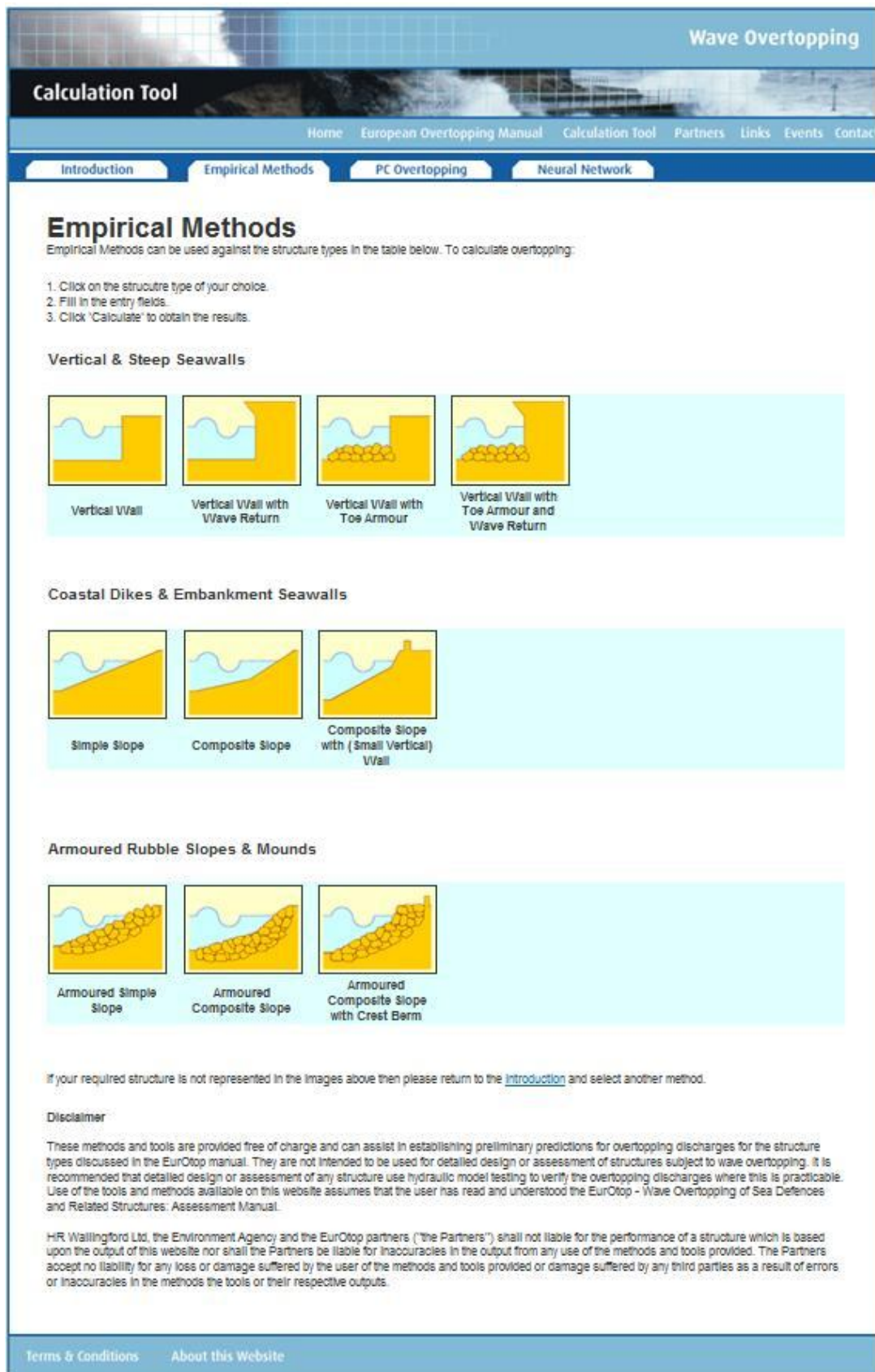


Figura 11 - Ecrã de escolha do tipo de estrutura em estudo para aplicação das fórmulas empíricas (http://www.overtopping-manual.com/calculation_empirical.html)

Após selecção do tipo de estrutura e secção transversal a analisar, abre-se uma janela que permite a introdução dos parâmetros hidráulicos e estruturais para a previsão do caudal médio galgado (Figura 12).

Wave Overtopping

Calculation Tool

Home European Overtopping Manual Calculation Tool Partners Links Events Contact

Introduction Empirical Methods **PC Overtopping** Neural Network

Armoured Composite Slope with Crest Berm

Method Selection ☒ Probabilistic ☐ Deterministic

Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

0.259

T (wave period) 7 s ☐ Tm ☐ Tp ☒ Tm-1,0

Hm0 (Wave Height at the Toe of the Structure) 5.22 m

Rc (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) 9.5 m

Gc (The width of the structure crest) 4.59 m

Lower Slope 3 in 2 (e.g. 1 in 2)

Upper Slope 3 in 2 (e.g. 1 in 2)

V (coefficient for reduction factors) Antifers (0.47)

Calculate Overtopping Rate

Terms & Conditions About this Website

Figura 12 - Exemplo de uma janela para introdução dos parâmetros hidráulicos e estruturais para a previsão do caudal médio galgado
 (http://www.overtopping-manual.com/EmpArmourSlope_CompositeWall.aspx)

Esta ferramenta baseia-se essencialmente nas fórmulas empíricas que se apresentam seguidamente para cálculo determinístico e probabilístico do galgamento.

O cálculo determinístico é normalmente utilizado para o dimensionamento de novas estruturas ou para a verificação da segurança de estruturas já existentes e relaciona parâmetros estruturais (R_c , γ_f e γ_β) e hidráulicos (H_{m0}) para a obtenção do galgamento médio.

O cálculo determinístico é obtido para todos os modelos a partir de um valor médio de resultados e considerando um desvio padrão, o que permite em geral uma abordagem mais segura e tem em conta as incertezas do modelo, conforme a equação 3.4.

$$q = 0.2 \cdot \exp\left(-2.3 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \cdot \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \quad (3.4)$$

Válida para estruturas com uma inclinação do talude da ordem de 1:1.5 ou mais.

O cálculo probabilístico é utilizado para o dimensionamento probabilístico, previsão de medições ou comparação com medições em laboratório ou no protótipo. Os resultados do cálculo probabilístico descrevem uma média aproximada de todos os valores de dados experimentais, o que significa que, para variáveis de distribuição normal, cerca de 50% desses valores excede a previsão do modelo e 50% fica abaixo dos valores previstos. O coeficiente 2.6, na equação 3.5, permite uma previsão da média do caudal médio de galgamento e tem associado um desvio padrão de $\sigma = 0.35$. O caudal médio pode ser obtido através da equação 3.5:

$$q = 0.2 \cdot \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \cdot \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \quad (3.5)$$

em que:

- q - caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura;
- R_c - altura de coroamento da estrutura acima do nível de repouso;

H_{m0} - altura de onda significativa em frente à estrutura;

γ_f - coeficiente de redução de galgamento devido à rugosidade/permeabilidade da estrutura, de acordo com a Tabela 3;

γ_β - coeficiente de redução do galgamento devido ao ângulo de incidência da onda na estrutura;

g - aceleração da gravidade.

O coeficiente de redução devido ao ângulo de incidência da onda na estrutura pode ser calculado através da seguinte expressão 3.6:

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0063 |\beta| \text{ para } 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ \quad (3.6)$$

para $|\beta| > 80^\circ$ usar $\beta=80^\circ$

para $|\beta| > 110^\circ$ assume-se $q=0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

O efeito da berma no topo do talude pode ser tido em consideração no caudal médio galgado através do coeficiente de redução, C_r , calculada através das seguintes expressões 3.7 e 3.8:

$$q' = q \times C_r \quad (3.7)$$

$$C_r = 3.06 \exp\left(-1.5 \frac{G_c}{H_{m0}}\right), \quad (3.8)$$

com um máximo de $C_r = 1$.

em que:

q' - caudal médio galgado após a berma de coroamento [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$];

q - caudal médio de galgamento [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$];

C_r - factor que tem em conta a presença da berma de coroamento [-];

G_c - largura da berma de coroamento da estrutura [m].

3.4. Redes Neurais

3.4.1.Introdução

Como se referiu anteriormente, existe uma grande variedade de formulações empíricas para a determinação do galgamento. No entanto, a dependência fortemente não linear do fenómeno do galgamento em relação aos factores condicionantes, tornam o problema de calcular e prever o galgamento difícil de resolver.

De facto, num conjunto relevante de casos descritos na literatura especializada, verificam-se discrepâncias nos valores estimados quando diferentes formulações são usadas (e.g. Reis *et al.*, 2008).

Foi no sentido de minorar estas dificuldades que nas últimas décadas se apostou no desenvolvimento de métodos de previsão do caudal médio galgado baseado em modelos de redes neuronais (e.g., no âmbito do projecto Europeu CLASH, mas não só).

Uma rede neuronal assemelha-se ao sistema nervoso central do ser humano, que revela uma extraordinária capacidade para executar de uma forma rápida e eficiente tarefas de grande complexidade, tais como o processamento da informação, memória associativa e a capacidade para classificar e generalizar conceitos.

Estes factos têm servido de motivação quer para o estudo detalhado da constituição do cérebro, quer para a sua imitação na concepção de sistemas com capacidades atrás referidas e designados por redes neuronais artificiais (*RNA*).

As redes neuronais artificiais têm sido utilizadas na modelação de memória associativa, reconhecimento de padrões, representação de funções booleanas, representação de funções contínuas, previsão de séries temporais, optimização, etc. São aplicadas em algumas áreas, tais como (Moreira, 1997):

- Indústria (e.g. aeroespacial, transportes, petrolífera, electrónica);
- Medicina;

- Robótica;
- Reconhecimento de texto, imagem e voz;
- Economia e gestão;
- Análise financeira e banca;
- Engenharias;
- etc.

Como na sua base está o funcionamento do sistema nervoso, no ponto 3.4.2 apresenta-se uma breve descrição do sistema nervoso e no ponto 3.4.3 o seu paralelismo com as redes neuronais.

3.4.2.Sistema Nervoso

O sistema nervoso divide-se em sistema nervoso central (SNC) e sistema nervoso periférico (SNP), onde o primeiro é formado pelo encéfalo e medula espinhal e o segundo pelos nervos e gânglios nervosos.

É constituído por neurónios que são responsáveis pela recepção e pela transmissão de impulsos nervosos unidireccionais sob a forma de sinais eléctricos (predominantemente no interior de cada neurónio) e químicos (nas regiões terminais das ligações sinápticas).

O espaço entre a dendrite de um neurónio e o axónio de outro chama-se sinapse que é por onde os sinais são transportados por uma variedade de substâncias químicas.

3.4.3.Redes Neuronais Artificiais

As redes neuronais artificiais são um tipo de Inteligência Artificial (IA), que tenta simular em máquinas (computadores) o funcionamento de cérebro humano, de um modo simples. Como já foi referido anteriormente, esta é capaz de reconhecer padrões e detectar relações entre um conjunto de dados aparentemente ilógicos (desconexos). Além disso, revela a capacidade de lidar com dados incompletos, imprecisos, conflituosos e de prever sistemas não lineares, o que torna a sua aplicação no campo das engenharias, nomeadamente Engenharia Costeira e

Portuária, bastante atractiva, pois muitas vezes nestas áreas trabalham-se com complexos fenómenos físicos.

Uma rede neuronal, segundo Haykin (2001), pode ser definida como um processador, constituído por unidades de processamento simples, que têm a tendência natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Ela assemelha-se ao cérebro em dois aspectos:

- o conhecimento é adquirido pela rede a partir do seu ambiente através de um processo de aprendizagem;
- as ligações entre neurónios são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.

As redes neuronais são formadas por neurónios artificiais (Figura 13) e ligações entre eles. O neurónio artificial representa a região onde as informações são processadas. Os seus três elementos básicos são: os pesos sinápticos, a função de soma e a função de transferência.

As dendrites foram substituídas por entradas, cujas ligações com o corpo celular artificial são realizadas através de elementos chamados de pesos (simulando as sinapses). Os estímulos captados pelas entradas são processados pela função de soma e o limiar de disparo do neurónio biológico foi substituído pela função de transferência.

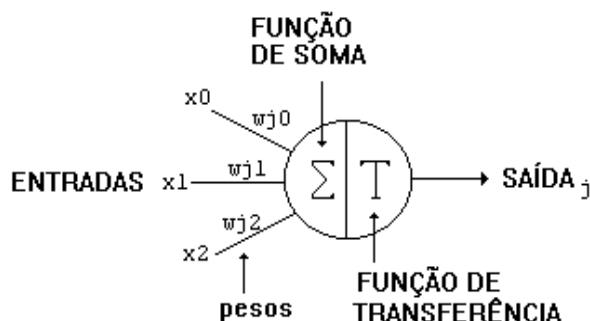


Figura 13 - Esquema de um neurónio artificial (Tafner, 1998)

Combinando diversos neurónios artificiais pode-se formar o que é chamado de rede neuronal artificial. As entradas, simulando uma área de captação de estímulos, podem ser conectadas em muitos neurónios, resultando, assim, numa série de saídas, onde cada neurónio representa uma saída. Essas ligações, em comparação com o sistema biológico, representam o contacto das dendrites com outros neurónios, formando assim as sinapses. A função da ligação em si é tornar o sinal de saída de um neurónio num sinal de entrada de outro, ou ainda, orientar o sinal de saída para o mundo externo (mundo real). As diferentes possibilidades de ligações entre as camadas de neurónios podem gerar n números de estruturas diferentes (Figura 14).

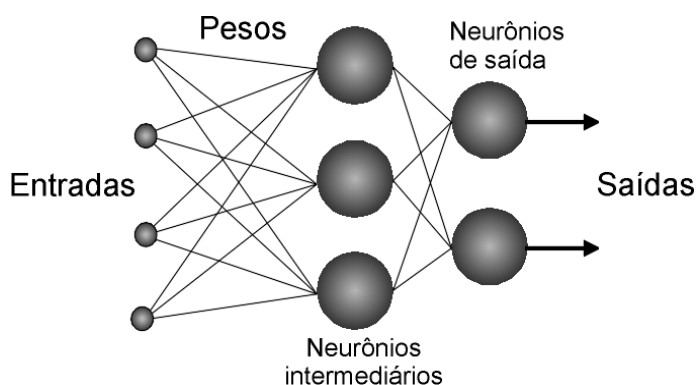


Figura 14 - Exemplo de rede neuronal com duas camadas, quatro entradas e duas saídas (Tafner, 1998)

O processo de aprendizagem de uma rede neuronal artificial pode ser realizado com ou sem supervisão. Na aprendizagem com supervisão são conhecidas *a priori* as respostas correctas correspondentes a um certo conjunto de dados de entrada. A aprendizagem sem supervisão é essencialmente aplicada em sistemas de memória associativa e de reconhecimento de padrões. Nestas redes a aprendizagem é realizada sem se conhecer antecipadamente as respostas consideradas correctas.

3.4.4.Ferramenta NN_OVERTOPPING2

No âmbito do projecto Europeu CLASH, onde se abordou a problemática da modelação e previsão do galgamento numa vasta gama de estruturas marítimas, em protótipo e em laboratório, surgiu a ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING2.

Esta ferramenta resulta da análise de 700 redes neuronais baseadas em 8400 combinações de *input-output* provenientes de ensaios em modelo físico, realizados em diferentes laboratórios da Europa, América e Japão, para diversas características da agitação e diferentes tipos de estruturas, tais como, quebra-mares de talude, de estrutura mista e verticais (Steendam *et al.*, 2004).

Esta ferramenta calcula os valores do caudal médio de galgamento, q , os intervalos de confiança associados e o caudal esperado no protótipo, i.e. o valor de q corrigido tendo em conta alguns efeitos de escala e de modelo.

As 700 redes neuronais estão dispostas por camadas (Figura 15), em que a primeira é denominada por “Camada de Entrada”, que é constituída por vários “neurónios”, em número igual aos parâmetros de entrada (15 parâmetros: β , h , H_{m0} , $T_{m-1,0}$, h_t , B_t , γ_f , $\cot \alpha_d$, $\cot \alpha_u$, R_c , B , h_b , $\tan \alpha_B$, A_c , G_c). Existe também a última camada, ou “Camada de Saída”, que é constituída pelo número de “neurónios” dos parâmetros a serem estimados (o parâmetro q). Entre estas duas camadas existe uma “Camada Escondida”, onde verdadeiramente se processa a informação. Cada “neurónio” desta camada recebe a informação da “Camada de Entrada” e através de conexões a informação é transmitida à “Camada de Saída”.

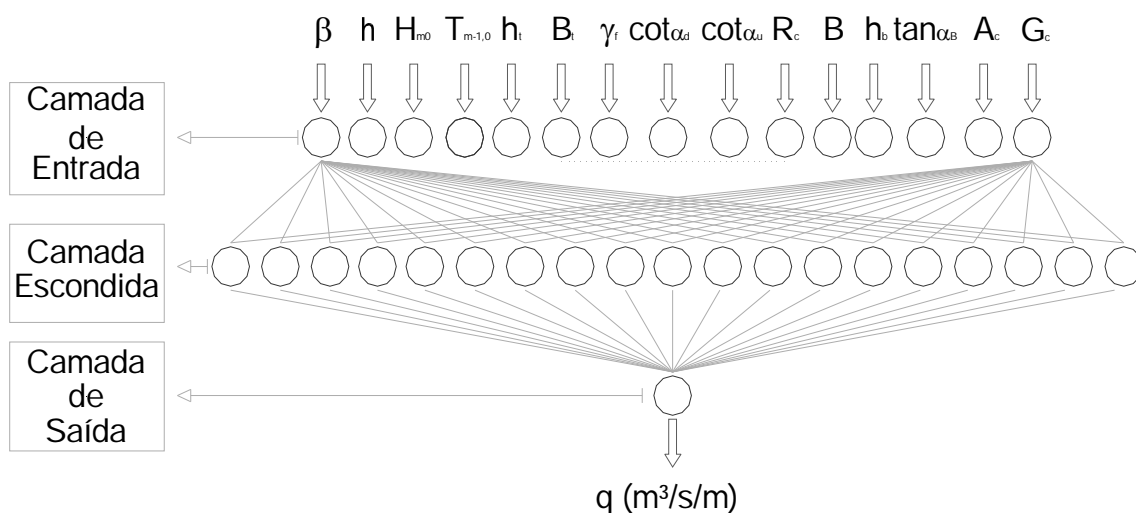


Figura 15 - Esquema das redes neuronais em que se baseia a ferramenta NN_OVERTOPPING2

Como mencionado acima, a ferramenta usa 15 parâmetros de entrada, nomeadamente parâmetros hidráulicos e estruturais que incluem informação sobre a onda e a geometria da estrutura (Figura 8 e Figura 16).

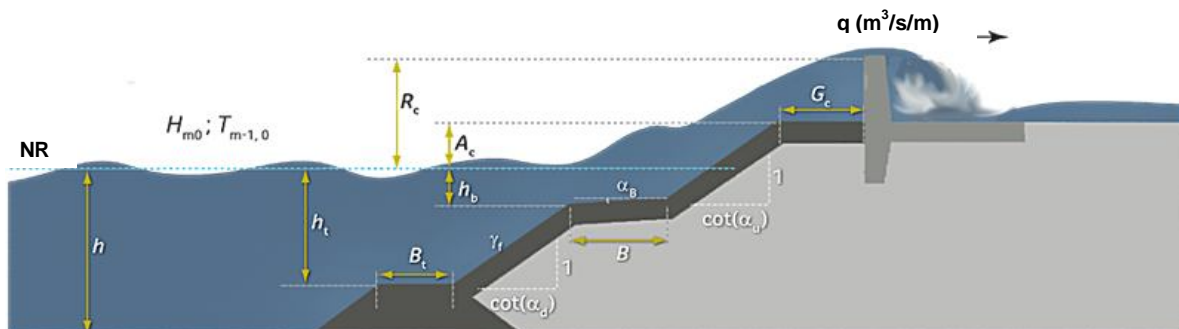


Figura 16 - Parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2

Para a descrição da agitação marítima, são considerados 3 parâmetros:

- H_{m0} [m]: Altura de onda significativa em frente à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro, m_0 ;
- $T_{m-1,0}$ [s]: Período médio em frente à estrutura, calculado com os momentos espectrais m_{-1} e m_0 . Por vezes este parâmetro não é conhecido, podendo relacionar-se com o período de pico, T_p , através da expressão $T_{m-1,0} = T_p / 1.1$ (esta expressão é válida para espectros com uma configuração semelhante à do espectro empírico de JONSWAP*);
- β [°]: Ângulo entre a direcção de propagação da agitação e a direcção normal à estrutura.

Para a descrição da estrutura, são considerados 12 parâmetros:

- h [m]: Profundidade em frente à estrutura, mais precisamente, a altura de água imediatamente a montante da estrutura;
- h_t [m], B_t [m]: Profundidade e largura da banquetta do pé do talude da estrutura. Se não existir banquetta h_t e B_t são iguais a zero;

*JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) – relação empírica que define a distribuição da energia com a frequência das ondas do mar.

- B [m], h_b [m], $\tan \alpha_B$ [-]: parâmetros que descrevem a berma da estrutura: largura medida horizontalmente; profundidade na berma medida no centro desta; e inclinação da berma. Se a berma estiver acima do nível de água, h_b é negativo. Se a berma for horizontal, $\tan \alpha_B$ é igual a zero;
- R_c [m], A_c [m], G_c [m]: parâmetros que descrevem a parte superior da estrutura: distância entre o nível de repouso e a cota de coroamento da estrutura, medida verticalmente do nível da água ao ponto mais alto impermeável da estrutura; distância entre o nível de repouso e a berma de coroamento da parte permeável da estrutura; e largura da berma de coroamento;
- $\cot \alpha_d$ [-], $\cot \alpha_u$ [-]: declives da estrutura abaixo e acima da berma, respectivamente;
- γ_f [-]: coeficiente de redução do galgamento devido à rugosidade/permeabilidade da estrutura (de acordo com a Tabela 3).

Tabela 3 - Valores do coeficiente de rugosidade/permeabilidade para alguns tipos de manto de protecção (adaptado de Coeveld *et al.*, 2005).

Tipo de Manto de Protecção	γ_f
Superfície lisa e impermeável	1.00
Cubos (1 camada; colocação desarrumada)	0.52
Enrocamento; Cubos (2 camadas, colocação desarrumada); Cubos Antifer; Seabeas	0.50
Acrópodes, X-Blocks	0.49
Core-locs; HARO's	0.47
Dolos	0.43
Tetrápodes	0.40

A grande variedade de parâmetros de entrada e de saída que as redes neuronais permitem introduzir constitui uma grande vantagem para a aplicação desta metodologia de cálculo no estudo do fenómeno do galgamento.

Este método, para além de permitir a interligação, através de múltiplas conectividades, de todas as variáveis de entrada e de saída, permite também lidar com dados imprecisos e situações não totalmente definidas.

4. CASO DE ESTUDO

4.1. Porto de Pesca de Rabo de Peixe

O caso de estudo deste trabalho é o Porto de pesca de Rabo de Peixe, que se situa na costa Norte da Ilha de São Miguel, no concelho da Ribeira Grande, nos Açores (Figura 17).



Figura 17 - Localização do Porto de Rabo de Peixe (Google, 06/12/2010)

O porto localiza-se no interior de uma baía muito exposta à agitação dominante ao largo, nomeadamente Norte e Nor-Noroeste (Figura 18), e é abrigado parcialmente por um molhe-cais, em talude e com muro-cortina do lado exterior (Figura 21, Figura 22 e Figura 23).

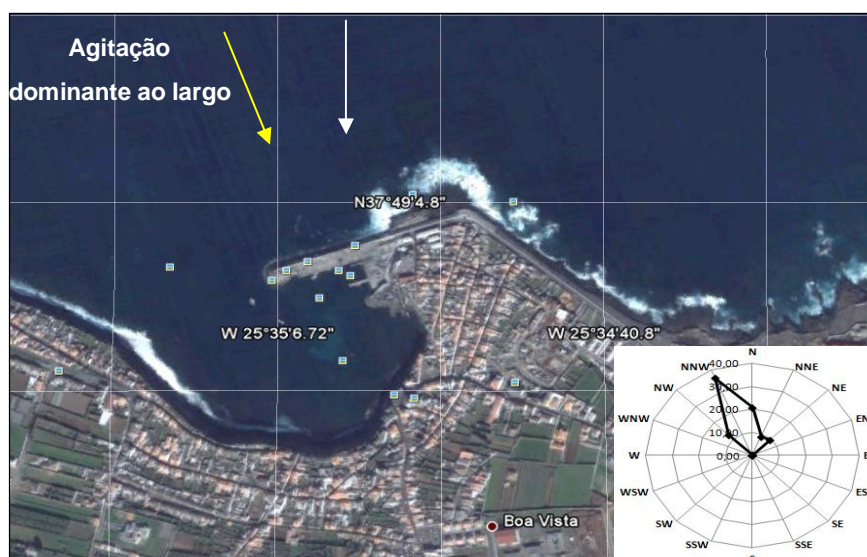


Figura 18 - Agitação dominante ao largo (Consulmar, 2010)

O molhe-cais do porto tem aproximadamente 246 m de comprimento e 34 m de largura (Figura 19, Figura 20 e Figura 21), com um muro-cortina de protecção com 6.5 m de altura (Figura 22). É uma estrutura de protecção portuária cujos perfis-tipo consistem, na parte exterior, num quebra-mar de talude, com um manto resistente protegido por duas camadas de blocos cúbicos Antifer de 150 kN e 300 kN (com um peso volúmico de 24 kN/m³) dispostos de forma irregular ao longo do seu desenvolvimento de inclinação 2(V):3(H) e na parte interior, por um cais de acostagem (Figura 21 e Figura 23).

O molhe-cais tem dois propósitos principais que são:

- Protecção do porto das acções do mar;
- Carga e descarga de embarcações de pesca.



Figura 19 - Vista geral do Porto de Rabo de Peixe



Figura 20 - Cabeça do molhe

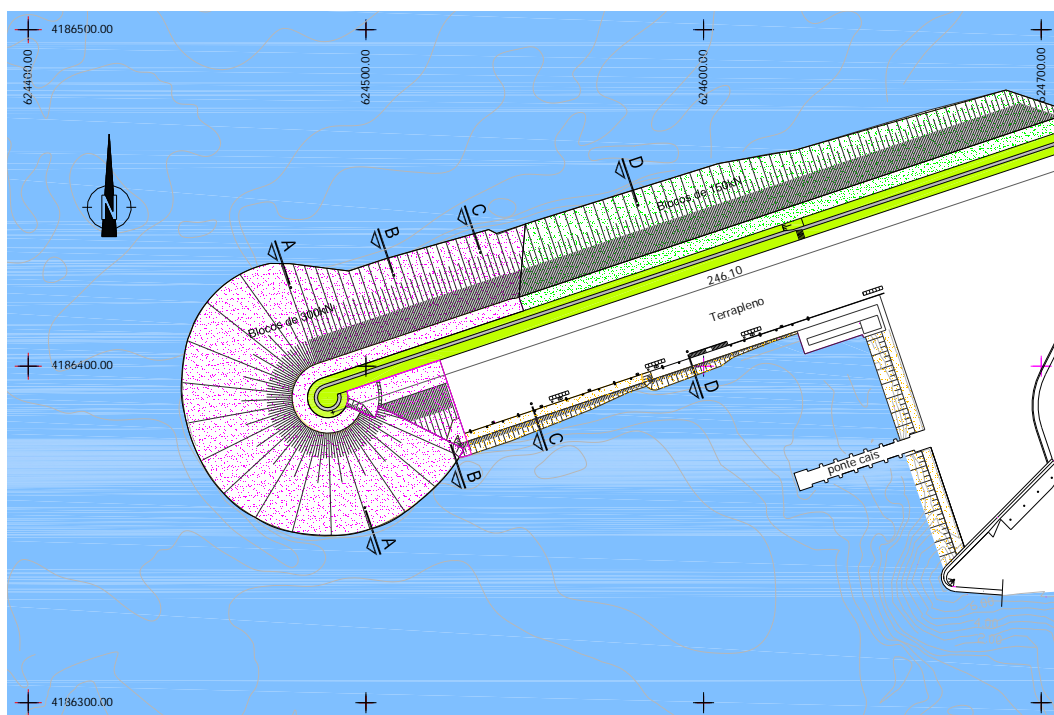
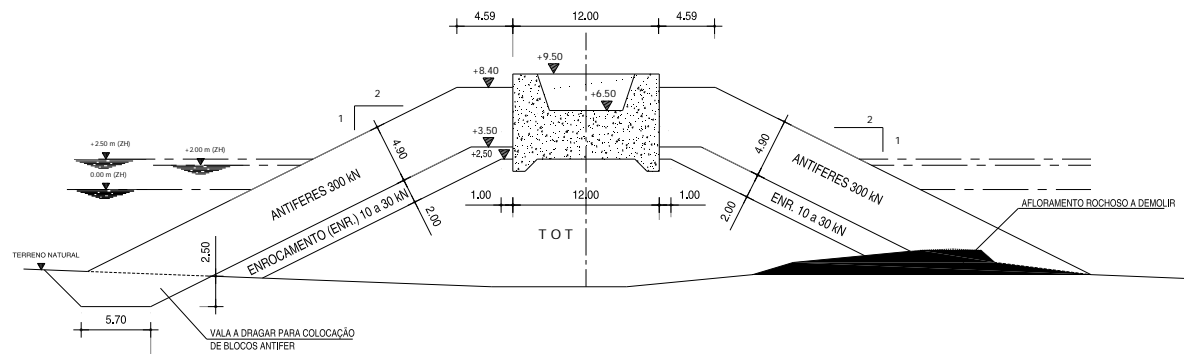


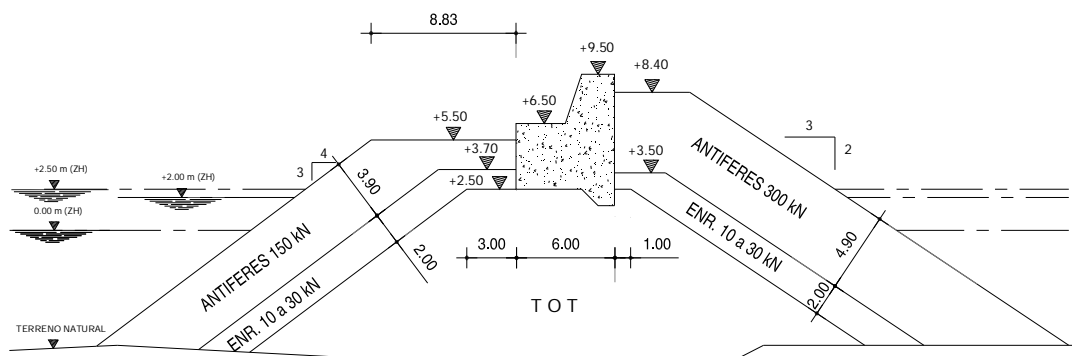
Figura 21 - Planta do molhe-cais do Porto de Rabo de Peixe



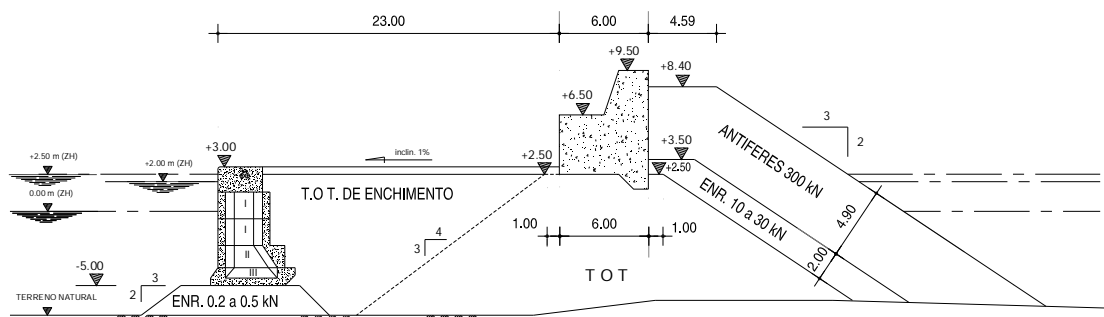
Figura 22 - Pormenor do muro-cortina



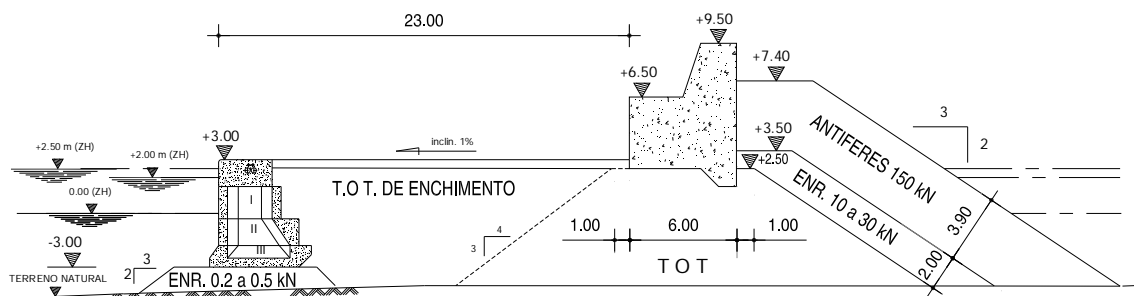
Perfil A - A



Perfil B - B



Perfil C - C



Perfil D - D

Figura 23 - Perfis tipo da secção transversal do molhe-cais do Porto de Rabo de Peixe

Actualmente, o porto apresenta algumas limitações à sua actividade em situação de tempestade, pois não é possível estacionar em flutuação no porto devido ao galgamento do seu molhe (Figura 24). A ondulação na bacia portuária, a reduzida dimensão do cais de acostagem, a lota, a zona de estacionamento das embarcações e o actual molhe de protecção, são alguns dos aspectos a corrigir para uma maior eficácia do porto.



Figura 24 - Obra existente e galgamento do muro-cortina

4.2. Modelação Física

4.2.1. Enquadramento

Pretende-se neste ponto desenvolver os principais aspectos da modelação física do porto de Rabo de Peixe nomeadamente os objectivos dos ensaios, as características da instalação experimental em que se efectuaram os ensaios, fazer-se uma breve abordagem à obra ensaiada no que respeita aos elementos reproduzidos, os níveis de maré e características da agitação marítima considerados nos ensaios de galgamento. Também descrever-se-á como se efectuaram as medições da agitação marítima, a avaliação do galgamento, as metodologias dos ensaios e por fim os resultados obtidos.

4.2.2. Objectivo dos Ensaios

No sentido de se melhorar as condições de segurança e operacionalidade do porto, a LOTAÇOR - Serviço de Lotas dos Açores, S.A. encomendou um estudo a um gabinete de projecto que propôs ao LNEC a realização de um vasto conjunto de ensaios tridimensionais em modelo físico reduzido para testar a eficiência e integridade das obras de expansão do porto de pesca. Estes ensaios englobaram ensaios para a avaliação dos galgamentos, quer para a situação existente, quer para a nova solução do muro-cortina do molhe. Os ensaios de galgamentos da situação existente são essenciais para apoiar o desenvolvimento da solução futura, por parte dos projectistas e serão utilizados para avaliar as diferentes ferramentas de cálculo.

4.2.3. Instalação Experimental

A instalação experimental utilizada nos ensaios descritos neste estudo é constituída por um tanque com um comprimento total de 23.0 m e 22.0 de largura, equipado com um gerador de ondas irregulares, com uma pá frontal com 6.0 m de comprimento e 1.20 m de altura (Figura 25 e Figura 26). O comando deste gerador e a recepção dos sinais provenientes das sondas foram efectuados por pessoal especializado do Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC.

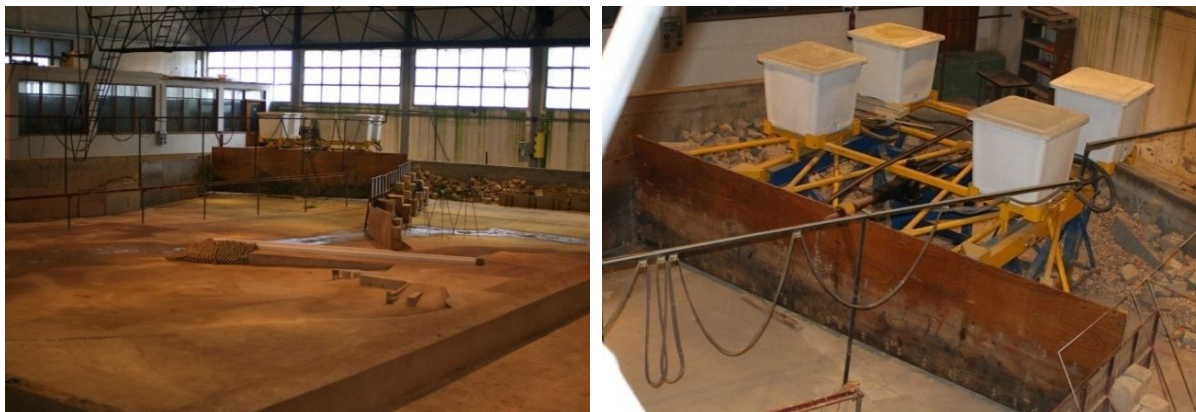


Figura 25 - Instalação de ensaio e gerador de ondas irregulares

Para que fosse atingido o objectivo dos ensaios, foi construído um modelo reduzido à escala geométrica de 1:54, sendo a sua exploração efectuada de acordo com a lei de semelhança de Froude.

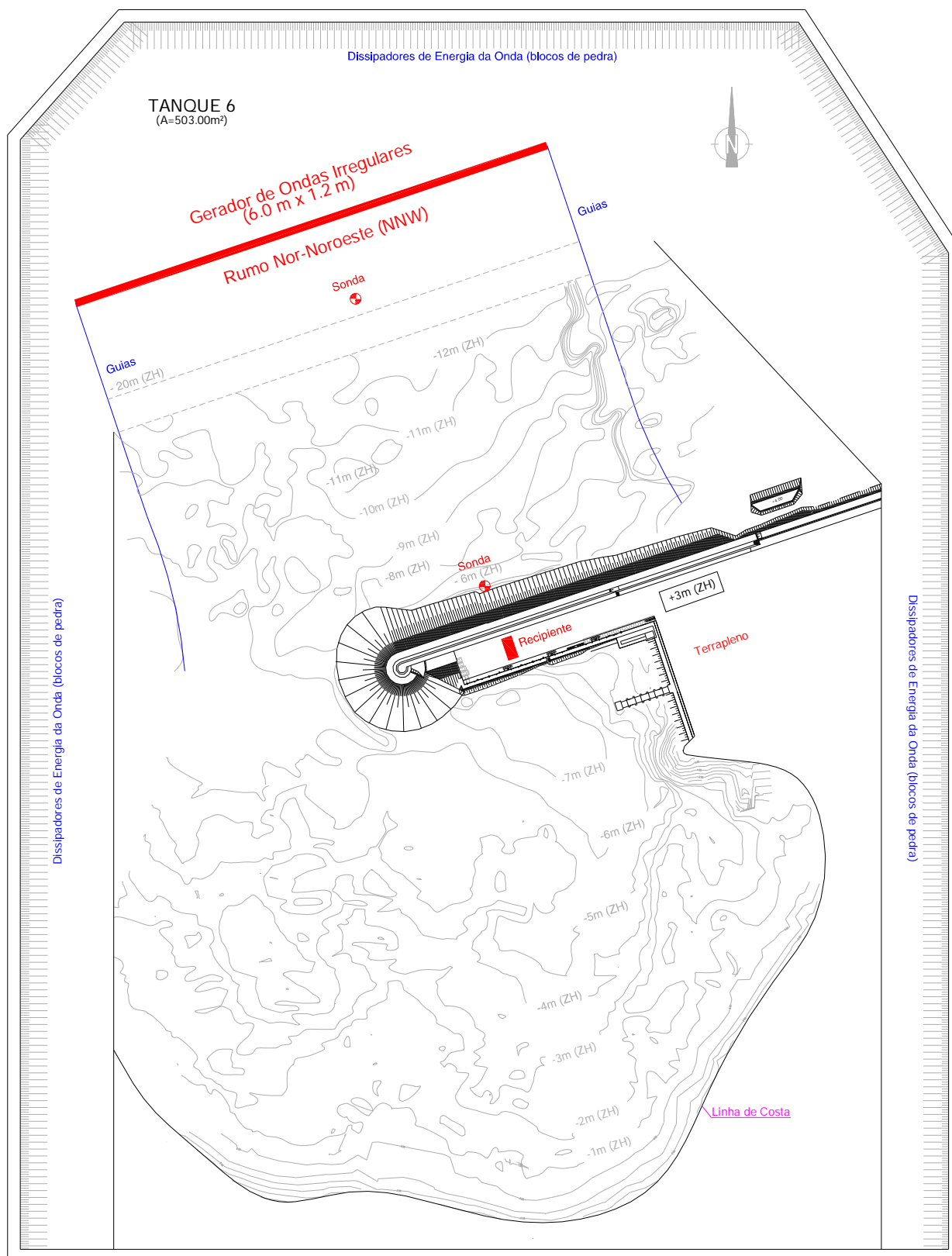


Figura 26 - Instalação de ensaio. Localização do modelo do porto e do equipamento de geração de ondas e de medição

4.2.4.Obra Ensaída

Numa primeira fase, foram reproduzidos os seguintes elementos do porto, tal como ele existe actualmente, (Figura 27):

- totalidade da bacia portuária;
- linha de costa envolvente da bacia portuária;
- obra de abrigo e obras interiores existentes;
- fundos do modelo, desde a linha de costa até à batimétrica de -20 m (ZH).



Figura 27 - Fases de construção do modelo do Porto de Rabo de Peixe

Numa segunda fase, procedeu-se à reprodução das obras de expansão do porto (Figura 28), introduzindo-se as seguintes alterações:

- aumento da cota de coroamento da obra existente;
- reprodução da segunda obra de abrigo (contra-molhe);
- reprodução das novas infra-estruturas portuárias.

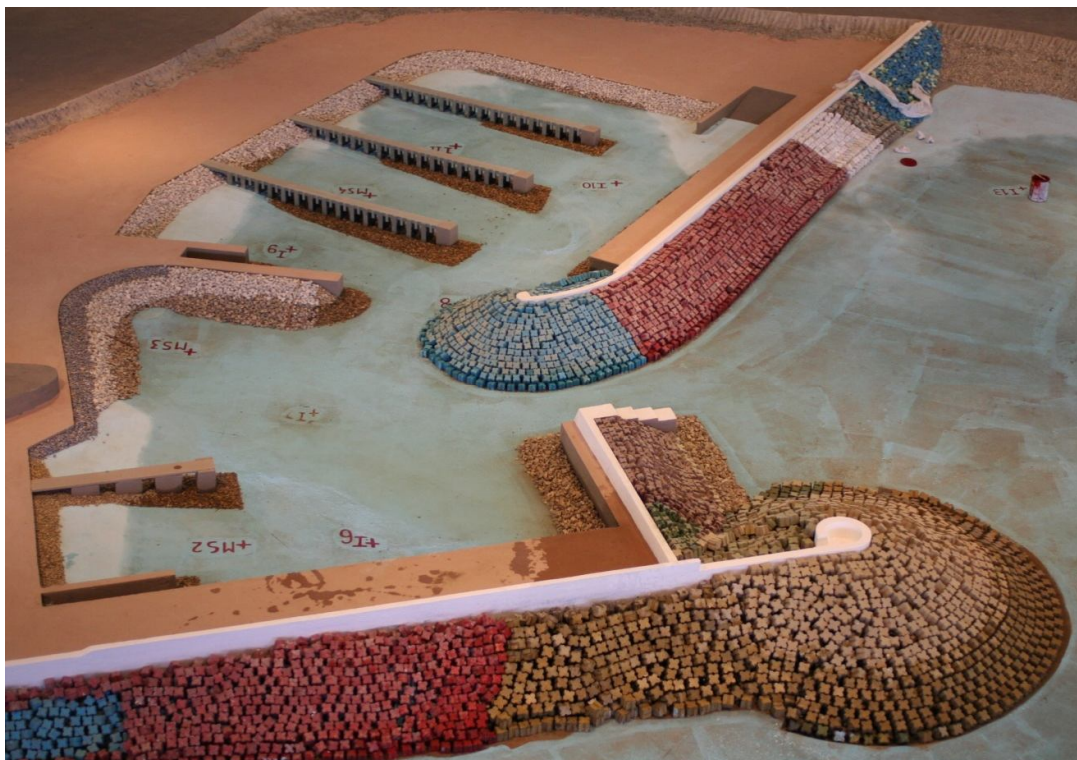


Figura 28 - Obras de expansão do Porto de Rabo de Peixe

Tal como referido anteriormente o presente documento concentra-se nos ensaios realizados para a situação actual do porto.

Lateralmente à zona de propagação da agitação marítima foram colocadas guias, (Figura 26), com um desenvolvimento o mais próximo possível do andamento das ortogonais das ondas, tendo em conta os períodos de onda ensaiados, os fundos e os níveis de maré reproduzidos.

Procurou-se simular da forma mais correcta possível as condições de reflexão de todos os elementos em redor do plano de água colocando-se dissipadores de energia, de modo a que os resultados dos ensaios fossem representativos da

situação real. A reflexão de ondas não desejadas pode alterar significativamente o campo de ondas incidente, podendo afectar os resultados dos ensaios laboratoriais. Nesse sentido optou-se por colocar, junto às paredes do tanque, materiais porosos (blocos de pedra) em talude (Santos, 2006), para dissipar as ondas incidentes nas paredes do tanque de ensaio.

4.2.5.Níveis de Maré e Agitação Marítima

Os níveis de maré e a agitação marítima reproduzidos nos ensaios que são objecto deste estudo tiveram as seguintes características:

- Níveis de maré:
 - Baixa-mar (BM): +0.0 m (ZH);
 - Preia-mar (PM): +2.0 m (ZH);
 - Preia-mar com sobrelevação meteorológica (PM+S): +2.5 m (ZH);
- Direcção da agitação marítima:
 - Nor-Noroeste, sobre a batimétrica -20 m (ZH);
- Ondas irregulares com uma configuração espectral empírica de JONSWAP;
- Períodos de pico do espectro, junto ao gerador de ondas, sobre a batimétrica -20 m (ZH):
 - Foram realizados três série de ensaios relativas a $T_p = 8$ s, 11 s e 14 s;
- Alturas de onda significativas (H_s), junto ao gerador, sobre a batimétrica -20 m (ZH):
 - Foram realizadas três séries de ensaios representativas de diferentes estados do mar, para as quais foram reproduzidos valores de H_s compreendidos entre 4.0 m e 7.5 m (ou valor inferior a este limite no caso de haver rebentação), cuja duração de actuação no modelo corresponde a 3 ou 6 horas no protótipo, segundo o plano de ensaios definido na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições de nível de maré e de agitação marítima reproduzidas nos ensaios de galgamento (valores do protótipo)

Série	Ensaio N°	Duração (Horas)	Nível de Maré (m (ZH))	Gerador	
				T _p (s)	H _s (m)
1	1	3		8	4.0
	2	6			5.0
	3	6			5.5
	4	6			6.0
	5	6			6.5
	6	3	+0.0	11	4.0
	7	6			5.0
	8	6			5.5
	9	6			6.0
	10	6			6.5
	11	3		14	4.0
	12	6			5.0
	13	6			5.5
	14	6			6.0
2	1	3		8	4.0
	2	6			5.0
	3	6			5.5
	4	6			6.0
	5	6			6.5
	6	3	+2.00	11	4.0
	7	6			5.0
	8	6			5.5
	9	6			6.0
	10	6			6.5
	11	6			7.0
	12	6			7.5
	13	3		14	4.0
	14	6			5.0
	15	6			5.5
	16	6			6.0
	17	6			6.5
	18	6			7.0
3	1	6		8	5.0
	2	6			5.5
	3	6			6.0
	4	6			6.5
	5	6	+2.50	14	5.0
	6	6			5.5
	7	6			6.0
	8	6			6.5
	9	6			7.0

Na fase de calibração do batedor e para cada período, estabeleceu-se uma relação entre a amplitude do movimento do batedor e a altura da onda gerada, traduzida por uma curva de calibração. A determinação das curvas de calibração teve por objectivo definir as alturas de onda significativas que iriam ser ensaiadas.

4.2.6.Medição da Agitação Marítima

A medição das características da agitação marítima (alturas e períodos) foi efectuada com uma sonda de condutância colocada junto ao gerador de ondas (batimétrica -20 m (ZH)) e outra no pé do talude da estrutura (batimétrica -6 m (ZH)) em frente ao local de medição dos galgamentos (Figura 26 e Figura 29). A sonda de condutância destina-se a medir a variação da elevação da superfície livre da água ao longo do tempo.

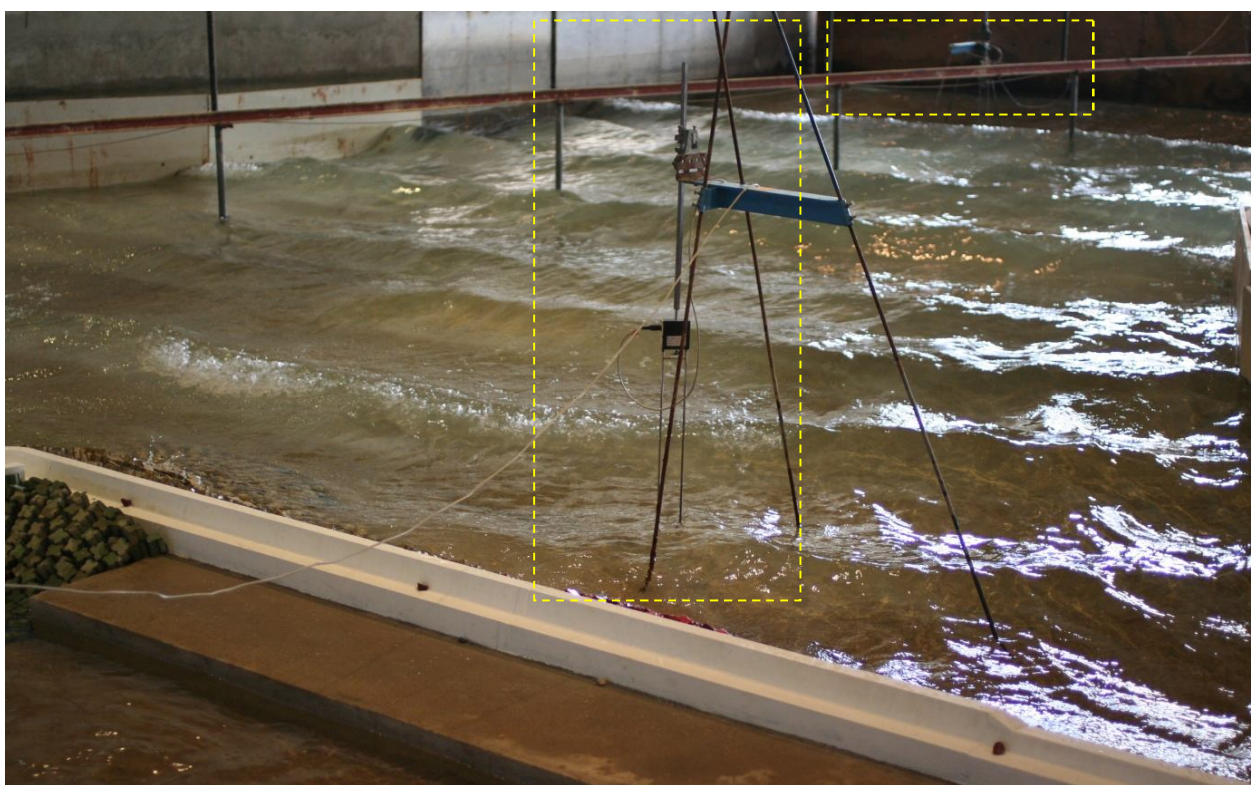


Figura 29 - Localização das sondas

No início de cada série de ensaios foi efectuada a calibração das sondas e obtiveram-se as constantes de calibração respectivas, as quais foram posteriormente utilizadas no tratamento de dados para obtenção das características

da agitação. A geração dos espectros da agitação incidente e a aquisição e o tratamento dos dados durante os ensaios foram efectuados mediante utilização do programa SAM – Simulação da Agitação Marítima (Capitão, 2002), ferramenta utilizada nos ensaios em modelo físico no Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC.

4.2.7. Avaliação do Galgamento

Os galgamentos da obra/modelo foram avaliados qualitativamente e quantitativamente.

A avaliação qualitativa resultou da observação visual do modelo e da utilização do critério de classificação de galgamentos adoptado correntemente no LNEC em ensaios com agitação irregular (Tabela 5).

Tabela 5 - Critério do LNEC de classificação de galgamentos do muro-cortina (LNEC, 1984)

Grau	Designação	Descrição
0	Inexistentes	Não há galgamento.
1	Início	As ondas de maior altura provocam a passagem de “salpicos”.
2	Ligeiros	Passagem frequente de “salpicos”, mas não ocorrem galgamentos constituídos por uma lâmina de água.
3	Moderados	As ondas de maior altura provocam a passagem de uma lâmina de água.
4	Importantes	Há frequentes galgamentos constituídos por uma lâmina de água.
5	Sérios	Há frequentes galgamentos constituídos por grandes massas de água.

Nota: Quando os galgamentos têm características intermédias entre duas classes consecutivas, A e B, é utilizada a simbologia A-B para os caracterizar.

A avaliação quantitativa resultou da medição dos volumes de galgamento numa secção do modelo físico reduzido. Para tal, utilizou-se um recipiente com 0.25 m de largura posicionado no local de medição e que se apresenta na Figura 30. Com base nestes volumes, determinaram-se os caudais médios de galgamentos por metro de desenvolvimento de estrutura, q (l/s/m).

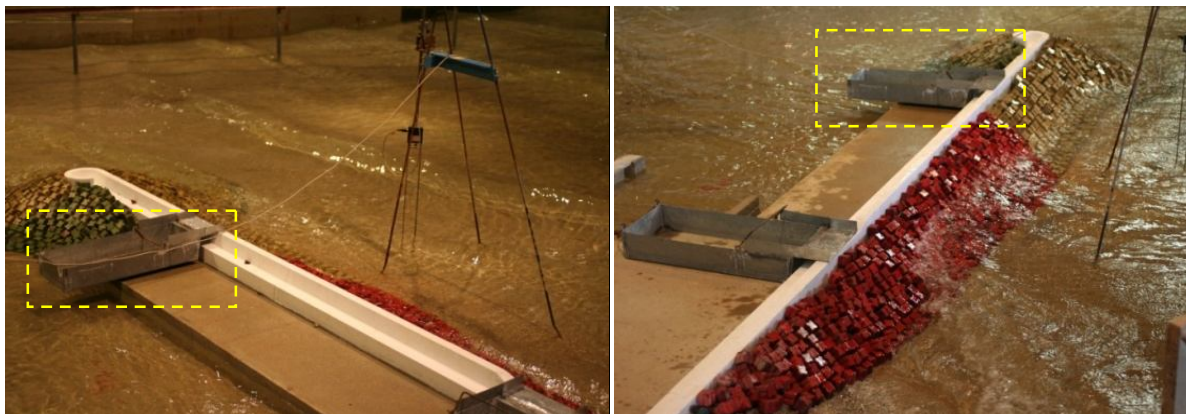


Figura 30 - Recipiente para recolha de água dos galgamentos

4.2.8. Metodologia dos Ensaios

A metodologia dos ensaios consistiu na realização de um conjunto de tarefas antes, durante e no final dos ensaios.

Considera-se como uma série de ensaios o conjunto de ensaios correspondente às várias alturas de onda crescentes, para um mesmo período e para um determinado nível de maré.

Relativamente a cada ensaio realizaram-se as seguintes tarefas para o caso de estudo em análise:

➤ Antes do ensaio

- reconstrução do modelo de acordo com o modo e a densidade de colocação dos blocos pretendidos;
- verificação do nível da água no modelo com o apoio de um hidrómetro;
- calibração das sondas;
- obtenção de fotografias do modelo;
- colocação do recipiente de recolha dos volumes de galgamento.

➤ Durante

- medição da elevação da superfície livre junto ao gerador e no pé da estrutura;
- qualificação do galgamento ocorrido segundo o critério do LNEC, (Tabela 5);
- obtenção de fotografias de ondas a galgarem a estrutura.

➤ No final do ensaio

- recolha do recipiente e medição do volume galgado;
- recolha de dados das sondas;
- obtenção de fotografias finais.

4.2.9. Resultados dos Ensaios

Como referido anteriormente os ensaios efectuados no modelo em termos de galgamento foram avaliados qualitativa e quantitativamente. O objectivo principal na análise qualitativa é a observação de galgamentos sob a forma de salpicos, lâminas de água ou massas de água para cada período de agitação, altura de onda e nível de maré. Na análise quantitativa, o objectivo prende-se com a medição dos caudais médios galgados por metro de desenvolvimento de estrutura. Estas informações permitem uma descrição objectiva da situação actual no Porto de Rabo de Peixe, essencial aos projectistas que pretendem apresentar uma solução segura e economicamente viável para a melhoria do Porto no que diz respeito ao galgamento (Figura 24). Os dados resultantes do modelo físico têm também particular interesse para este estudo, já que permitem por comparação testar as outras ferramentas de cálculo do galgamento (fórmulas empíricas e redes neuronais).

A solução a adoptar para a melhoria do Porto dependerá do tipo de galgamento ocorrido, do volume galgado e dos limites admissíveis de galgamento a estabelecer para evitar diferentes tipos de danos quer na estrutura, quer nas pessoas e bens, de acordo com a Tabela 1.

Do ponto de vista qualitativo, o grau de galgamento observado no modelo foram os que se apresentam na Tabela 6 e que a título de exemplo, estão ilustrados na Figura 32 (galgamento provocado por salpicos) e na Figura 33 (galgamento provocado por lâminas de água).

Os valores de $T_{m-1,0}$ e H_{m0} indicados na Tabela 6 referem-se ao período médio espectral, obtido a partir do período de pico, T_p , medido em frente à estrutura usando a relação $T_{m-1,0} = T_p / 1.1$ e à altura de onda significativa em frente à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro (m_0).

Com o aumento do nível de maré espera-se que haja um aumento do grau do volume galgado conforme explicado no Capítulo 2, ponto 2.2.2.

Para o nível de maré de BM (+0.0), os graus atribuídos para o volume galgado variaram entre 0 (galgamentos inexistentes) e um máximo de 2 (galgamentos ligeiros), este último ocorrido para $T_p = 14$ s e para as ondas de maiores alturas.

Para o nível de maré de PM (+2.00), registaram-se graus que variaram entre 0 e um intermédio entre 4-5 (galgamentos importantes e sérios), para $T_p = 11$ s e $H_s = 7.5$ m (maior altura de onda deste período).

Para o nível de maré PM+S (+2.50), registaram-se graus que variaram entre 0-1 e um máximo de 4 (galgamentos importantes), para $T_p = 14$ s e $H_s = 7.0$ m (maior altura de onda deste período). Neste caso, o grau relativo ao máximo galgamento é semelhante ao obtido para o nível de PM para o mesmo valor de H_s .

Para cada série de ensaios (1, 2 e 3) e para três períodos de onda diferentes efectuaram-se ensaios para várias alturas de onda significativa, salientando-se que, com o aumento de H_s , o grau atribuído ao galgamento na maioria das situações aumentou.

Por exemplo, na 1ª serie de ensaios, correspondente a:

- BM; $T_p = 8$ s; $H_s = 5.5$ m; Grau 1

enquanto que para:

- BM; $T_p = 8$ s; $H_s = 6.0$ m; $H_s = 6.5$ m; Grau 1-2.

Os resultados dos ensaios efectuados mostram que existe uma relação entre o grau atribuído ao volume galgado e o nível de maré, os períodos gerados e a altura de onda significativa.

Repare-se na Tabela 6 que H_s medidas ao largo sofrem um decréscimo com o aproximar da estrutura, conforme registado pela sonda colocada em frente à

estrutura que mede a altura significativa (H_{m0}), devendo essa diminuição ser provocada essencialmente pelo fenómeno da rebentação.

Tabela 6 - Grau de galgamentos para - BM, PM e PM+S

Série	Ensaio Nº	Duração (horas)	Nível de Maré (m (ZH))	Gerador		Obra			Grau
				T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	H_{m0} (m)	
1	1	3			4.0	8	7	2.6	0
	2	6			5.0	8	7	4.0	0-1
	3	6		8	5.5	8	7	4.5	1
	4	6			6.0	8	7	5.0	1-2
	5	6			6.5	8	7	5.2	1-2
	6	3			4.0	11	10	2.7	0-1
	7	6			5.0	11	10	3.5	0-1
	8	6	+0.0	11	5.5	11	10	4.0	1
	9	6			6.0	11	10	4.2	1-2
	10	6			6.5	11	10	4.5	1-2
	11	3			4.0	14	13	3.0	0-1
	12	6			5.0	14	13	3.8	1-2
	13	6		14	5.5	14	13	4.2	2
	14	6			6.0	14	13	4.4	2
2	1	3			4.0	8	7	2.3	0
	2	6			5.0	8	7	3.6	1
	3	6		8	5.5	8	7	4.3	1
	4	6			6.0	8	7	4.8	1-2
	5	6			6.5	8	7	5.4	3
	6	3			4.0	11	10	2.6	0
	7	6			5.0	11	10	3.5	1
	8	6			5.5	11	10	3.8	1-2
	9	6	+2.00	11	6.0	11	10	4.5	3
	10	6			6.5	11	10	4.9	3-4
	11	6			7.0	11	10	5.3	4
	12	6			7.5	11	10	5.5	4-5
	13	3			4.0	14	13	2.9	0-1
	14	6			5.0	14	13	3.9	2-3
	15	6			5.5	14	13	4.4	3
	16	6		14	6.0	14	13	4.7	3-4
	17	6			6.5	14	13	4.9	4
	18	6			7.0	14	13	5.1	4
3	1	6			5.0	8	7	3.2	0-1
	2	6			5.5	8	7	3.7	1
	3	6		8	6.0	8	7	4.5	1-2
	4	6			6.5	8	7	5.2	2
	5	6	+2.50		5.0	14	13	3.5	1
	6	6			5.5	14	13	4.1	1-2
	7	6		14	6.0	14	13	4.6	3
	8	6			6.5	14	13	4.8	3-4
	9	6			7.0	14	13	5.1	4

A Figura 31 apresenta um aspecto da agitação na proximidade da obra para o nível de maré BM, $T_p = 14$ s e $H_s = 5.0$ m. Para este período, BM e $H_s = 5.0$ m

observaram-se galgamentos sobre a forma de salpicos e para PM e $H_s = 7.0$ m, sobre a forma de lâminas de água, tal como se pode observar na Figura 32 e Figura 33, respectivamente.

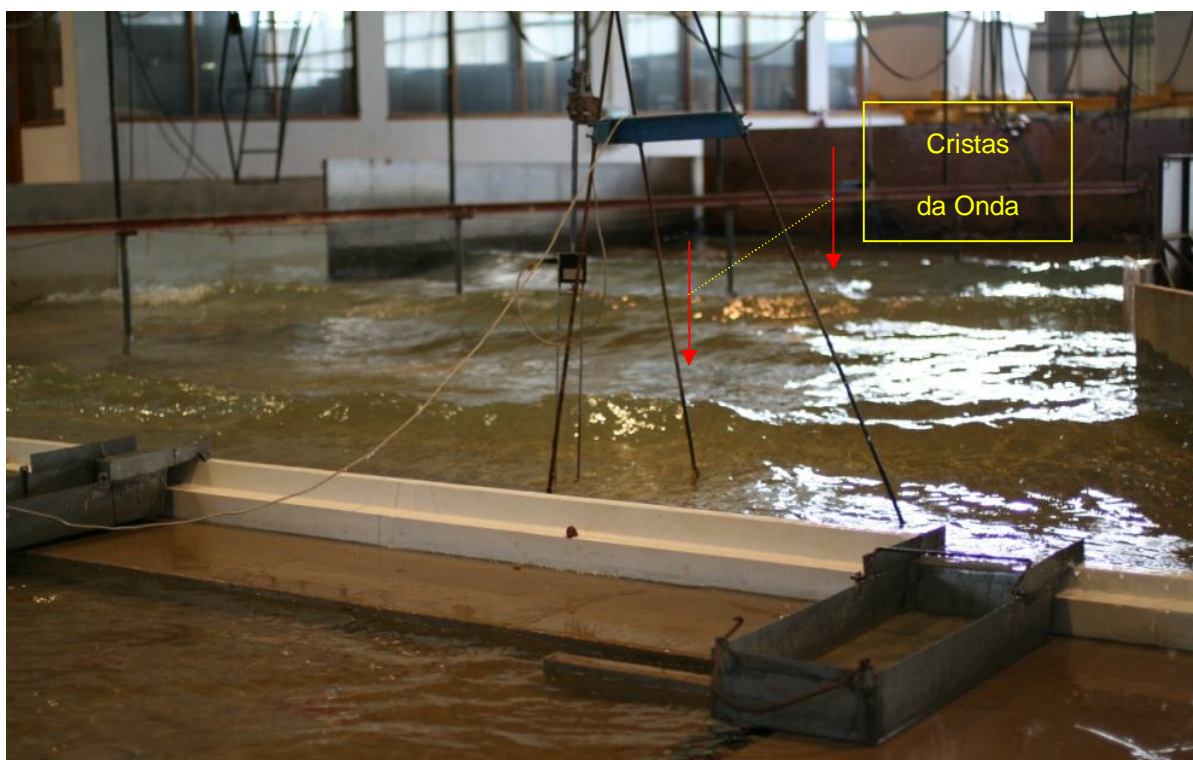


Figura 31 - Condições de agitação para: PM, $T_p=14$ s e $H_s=5.0$ m



Figura 32 - Galgamento provocado por salpicos: BM, $T_p=14$ s e $H_s=5.0$ m

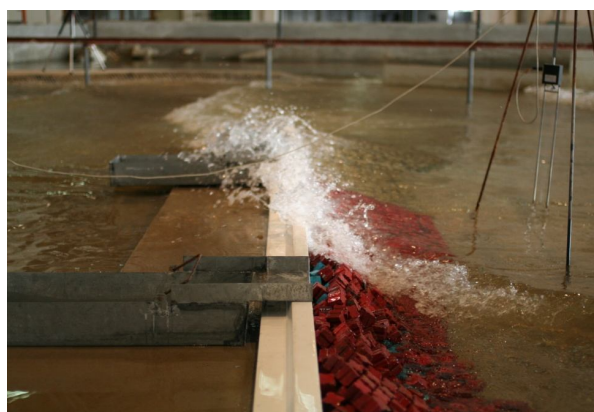


Figura 33 - Galgamento provocado por lâminas de água: PM, $T_p=14$ s e $H_s=7.0$ m

Do ponto de vista quantitativo, os caudais medidos no modelo físico (q_{MF}) foram os que se apresentam na Tabela 7, em valores do protótipo.

Tabela 7 - Resultados das medições do caudal médio de galgamentos (valores do protótipo)

Série	Ensaio Nº	Duração (horas)	Nível de Maré (m (ZH))	Gerador		Obra			q _{MF} (l/s/m)
				T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)	T _{m-1,0} (s)	H _{mo} (m)	
1	1	3		8	4.0	8.29	7	2.64	0.00
	2	6			5.0	8.14	7	3.96	0.00
	3	6			5.5	8.14	7	4.52	0.00
	4	6			6.0	8.13	7	4.96	0.00
	5	6			6.5	8.13	7	5.22	0.00
	6	3	+0.0	11	4.0	10.46	10	2.66	0.00
	7	6			5.0	10.61	10	3.54	0.00
	8	6			5.5	10.61	10	3.95	0.00
	9	6			6.0	10.81	10	4.16	0.00
	10	6			6.5	10.81	10	4.47	0.00
	11	3		14	4.0	13.77	13	2.98	0.00
	12	6			5.0	13.90	13	3.81	0.21
	13	6			5.5	13.90	13	4.15	0.37
	14	6			6.0	13.87	13	4.37	0.61
2	1	3		8	4.0	7.93	7	2.32	0.00
	2	6			5.0	7.88	7	3.56	0.04
	3	6			5.5	7.89	7	4.28	0.26
	4	6			6.0	7.88	7	4.83	0.48
	5	6			6.5	7.90	7	5.35	0.53
	6	3	+2.00	11	4.0	10.60	10	2.56	0.00
	7	6			5.0	10.62	10	3.45	0.04
	8	6			5.5	10.61	10	3.82	0.08
	9	6			6.0	10.63	10	4.46	0.45
	10	6			6.5	10.57	10	4.93	1.38
	11	6			7.0	10.61	10	5.29	1.85
	12	6			7.5	10.61	10	5.53	4.04
	13	3		14	4.0	13.71	13	2.86	0.00
	14	6			5.0	13.74	13	3.91	0.63
	15	6			5.5	13.75	13	4.40	2.86
	16	6			6.0	13.73	13	4.73	5.29
	17	6			6.5	13.71	13	4.90	7.99
	18	6			7.0	13.73	13	5.14	13.76
3	1	6		8	5.0	7.88	7	3.21	0.05
	2	6			5.5	7.88	7	3.72	0.11
	3	6			6.0	7.87	7	4.51	0.42
	4	6			6.5	8.04	7	5.16	0.86
	5	6	+2.50	14	5.0	13.69	13	3.51	0.24
	6	6			5.5	13.75	13	4.05	0.80
	7	6			6.0	13.75	13	4.63	3.07
	8	6			6.5	13.78	13	4.78	5.93
	9	6			7.0	13.77	13	5.09	9.52

Para o nível de maré de BM, o volume galgado por metro de desenvolvimento de estrutura é menor que para os outros níveis de água (PM e PM+S), com valores

que variam para entre 0 e 0.61 l/s/m para $T_p = 14$ s, conforme mostrado na Figura 34. Este comportamento já era esperado, pois quanto maior for a diferença entre a cota de coroamento da estrutura e o nível de referência, menor é a probabilidade de haver galgamento.

A observação do gráfico apresentado na Figura 34, também permite concluir que, no modelo físico em estudo, só se registam caudais galgamentos a partir de:

- BM; $T_p = 14$ s; $H_s > 5.0$ m.

De facto, verificaram-se galgamentos para os períodos de pico de 8 s e 11 s, conforme a Tabela 6, mas estes foram sob a forma de salpicos, o que os torna difíceis de quantificar. Esta é uma das limitações do equipamento de medição usado no modelo físico que tem a dificuldade em medir valores de caudal muito próximos do zero.

Comparando este resultado com os valores críticos do caudal médio de galgamentos registados na Tabela 1, para pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com percepção de que se pode molhar, os valores obtidos estão abaixo dos limites, que são 1-10 l/s/m.

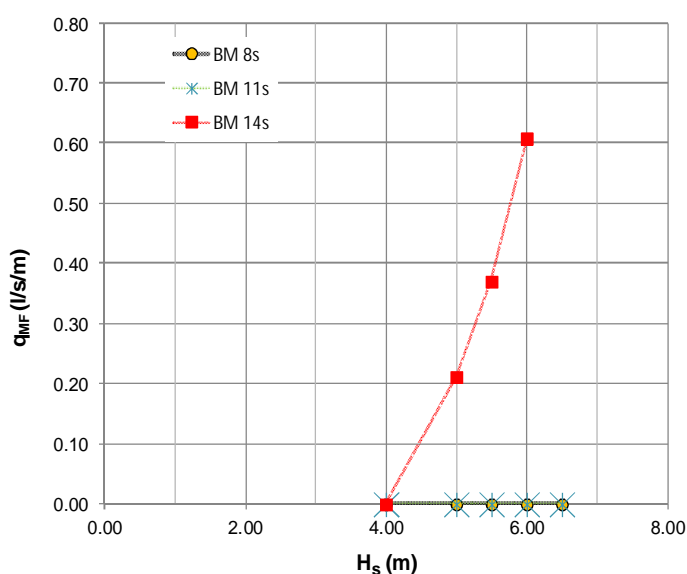


Figura 34 - Caudal médio de galgamento no modelo físico para BM

Para o nível de maré PM, o volume galgado variou entre 0 e um valor máximo de aproximadamente de 14 l/s/m, este último para o maior período de onda em estudo, $T_p = 14$ s, como representado na Figura 35. Salienta-se que, para este nível de maré, à medida que a altura de onda significativa aumenta, maior é o volume galgado, para os três períodos em estudo.

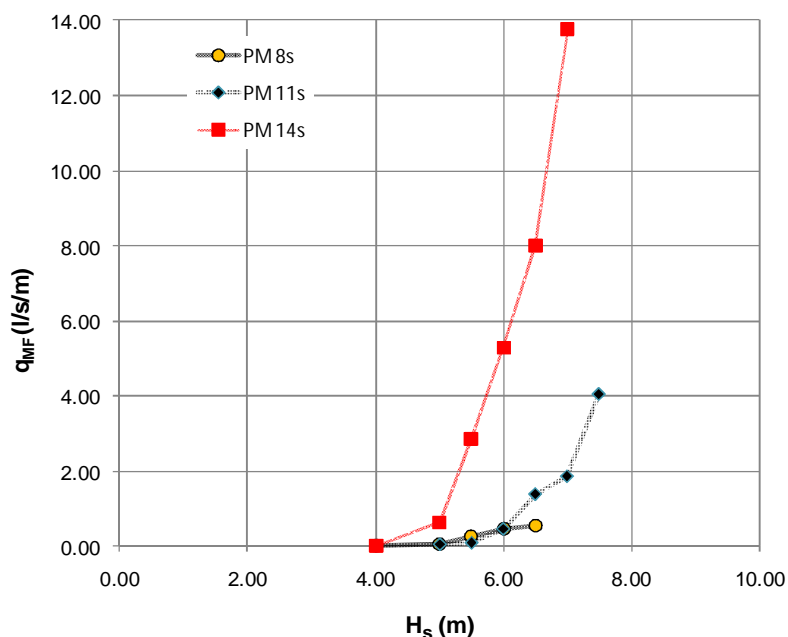


Figura 35 - Caudal médio de galgamento no modelo físico para PM

Comparando o valor máximo de galgamento obtido no modelo para este nível de maré, que foi 13.76 l/s/m, com os valores críticos do caudal médio de galgamentos definidos na Tabela 1, para Pessoas (1-10 l/s/m), conclui-se que apenas para a maior altura de onda e maior período ensaiados os limites de galgamento médio são ultrapassados.

Para o nível de maré de PM+S, o volume medido variou entre 0 e 9.52 l/s/m, como se pode ver na Figura 36. Ao contrário do que seria de esperar, o volume de água galgado por metro de desenvolvimento de estrutura registado não aumentou em relação ao nível anterior (PM), mas sim diminuiu. Esta diminuição de volume galgado deve-se à redução do valor de H_{m0} (apresentados na Tabela 7), o que se pode dever aos fortes efeitos tridimensionais que se verificaram na zona de medição.

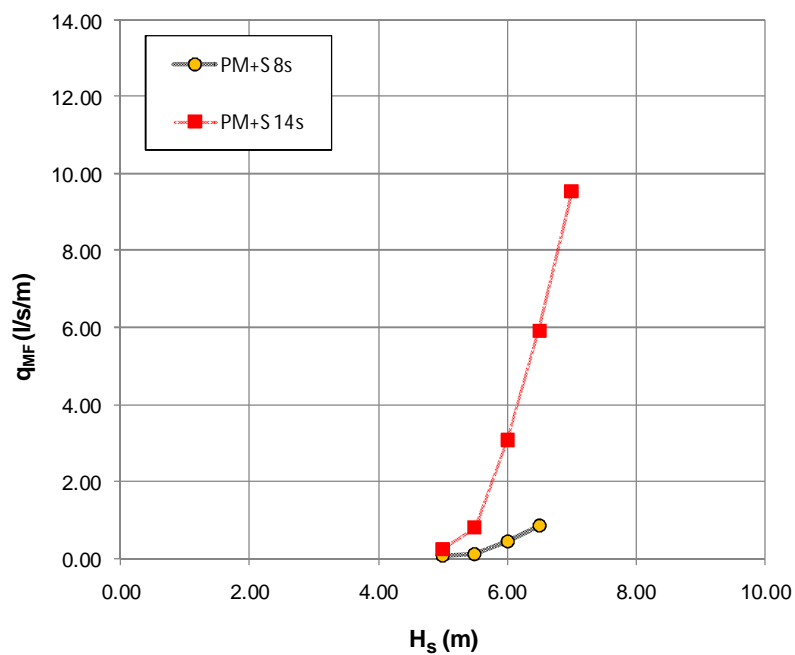


Figura 36 - Caudal médio de galgamento no modelo físico para PM+S

Pode-se concluir que o valor máximo de galgamento, 9.52 l/s/m, obtido nesta série de ensaios, encontra-se dentro dos limites aceitáveis, estabelecidos na Tabela 1, para Pessoas.

4.3. Métodos de Cálculo

Tal como referido anteriormente, no âmbito deste trabalho aplicaram-se as ferramentas empíricas para o cálculo do galgamento recomendadas no actual manual dos galgamentos (Pullen *et al.*, 2007) para o quebra-mar em estudo. Para o tipo de estrutura e geometria da secção transversal a analisar no âmbito deste trabalho (quebra mar com talude exterior, com berma de coroamento e superestrutura), seleccionou-se *online* o icon respectivo (Figura 37):

"Armoured Composite Slope with Crest Berm".

Onde as ferramentas sugeridas são, fórmulas empíricas e a ferramenta NN_OVERTOPPING2 que resulta da análise de redes neuronais artificiais (Figura 37).

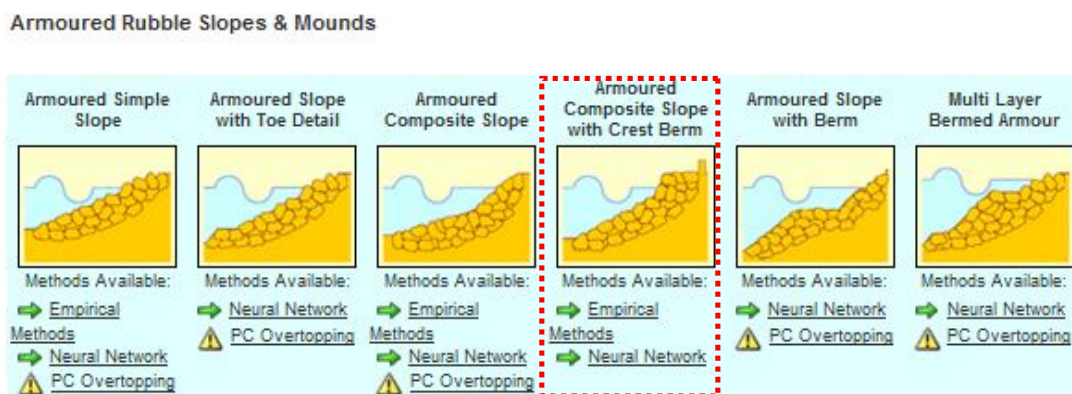


Figura 37 - Ecrã de escolha da metodologia de cálculo do galgamento para o tipo de estrutura em estudo (http://www.overtopping-manual.com/calculation_tool.html)

Descreve-se em 4.3.1 e 4.3.2 a aplicação dos dois métodos de cálculo ao caso de estudo analisado. Em 4.4 efectua-se a comparação dos resultados obtidos por via experimental e por via numérica.

4.3.1. Fórmulas Empíricas

Após selecção do tipo de estrutura e secção transversal a analisar, preencheu-se a janela de introdução dos parâmetros hidráulicos e estruturais (Figura 12) para a previsão do caudal médio galgado para as várias condições ensaiadas.

Seleccionou-se o método probabilístico de cálculo do galgamento, que é baseado em valores médios de caudais médios galgados e não tem consideração margens de segurança no que diz respeito às incertezas das previsões (Pullen *et al.*, 2007). Como mencionado na secção 3.3, este método é apenas aplicável para o dimensionamento probabilístico, previsão de medições ou comparação com medições.

Os resultados apresentados na Tabela 8 correspondem aos obtidos pelas fórmulas empíricas, onde o caudal médio galgado é definido por q_{FE} .

Tabela 8 - Resultados das fórmulas empíricas para o caudal médio de galgamentos

Parâmetros de Entrada													
Série	Ensaio Nº	Duração (horas)	Nível de Maré (m (ZH))	T _p (s)	H _s (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)	γ _f (-)	cotα _d (-)	cotα _u (-)	R _c (m)	G _c (m)	q _{FE} (l/s/m)
1	1	3		8	4.0	2.6	7	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.00
	2	6		8	5.0	4.0	7	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.01
	3	6		8	5.5	4.5	7	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.04
	4	6		8	6.0	5.0	7	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.13
	5	6		8	6.5	5.2	7	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.26
	6	3	+0.0	11	4.0	2.7	10	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.00
	7	6		11	5.0	3.5	10	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.00
	8	6		11	5.5	4.0	10	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.00
	9	6		11	6.0	4.2	10	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.01
	10	6		11	6.5	4.5	10	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.03
	11	3		14	4.0	3.0	13	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.00
	12	6		14	5.0	3.8	13	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.00
	13	6		14	5.5	4.2	13	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.01
	14	6		14	6.0	4.4	13	0.47	1.50	1.50	9.50	4.59	0.02
2	1	3		8	4.0	2.3	7	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.00
	2	6		8	5.0	3.6	7	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.02
	3	6		8	5.5	4.3	7	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.21
	4	6		8	6.0	4.8	7	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.91
	5	6		8	6.5	5.4	7	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	2.81
	6	3	+2.00	11	4.0	2.6	10	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.00
	7	6		11	5.0	3.5	10	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.01
	8	6		11	5.5	3.8	10	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.05
	9	6		11	6.0	4.5	10	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.35
	10	6		11	6.5	4.9	10	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	1.15
	11	6		11	7.0	5.3	10	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	2.49
	12	6		11	7.5	5.5	10	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	3.96
	13	3		14	4.0	2.9	13	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.00
	14	6		14	5.0	3.9	13	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.06
	15	6		14	5.5	4.4	13	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.30
	16	6		14	6.0	4.7	13	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	0.71
	17	6		14	6.5	4.9	13	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	1.07
	18	6		14	7.0	5.1	13	0.47	1.50	1.50	7.50	4.59	1.83
3	1	6		8	5.0	3.2	7	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	0.01
	2	6		8	5.5	3.7	7	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	0.07
	3	6		8	6.0	4.5	7	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	0.75
	4	6		8	6.5	5.2	7	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	3.26
	5	6	+2.50	14	5.0	3.5	13	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	0.03
	6	6		14	5.5	4.1	13	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	0.20
	7	6		14	6.0	4.6	13	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	1.01
	8	6		14	6.5	4.8	13	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	1.44
	9	6		14	7.0	5.1	13	0.47	1.50	1.50	7.00	4.59	2.83

O gráfico apresentado na Figura 38 representa, para o nível de maré de BM, o volume galgado por metro de desenvolvimento de estrutura, associado às diferentes alturas de onda significativas, H_s , que variaram entre os 4.0 m e os 6.5 m. O caudal aumenta com o aumento de H_s para os três períodos analisados, tal como ocorria em modelo físico.

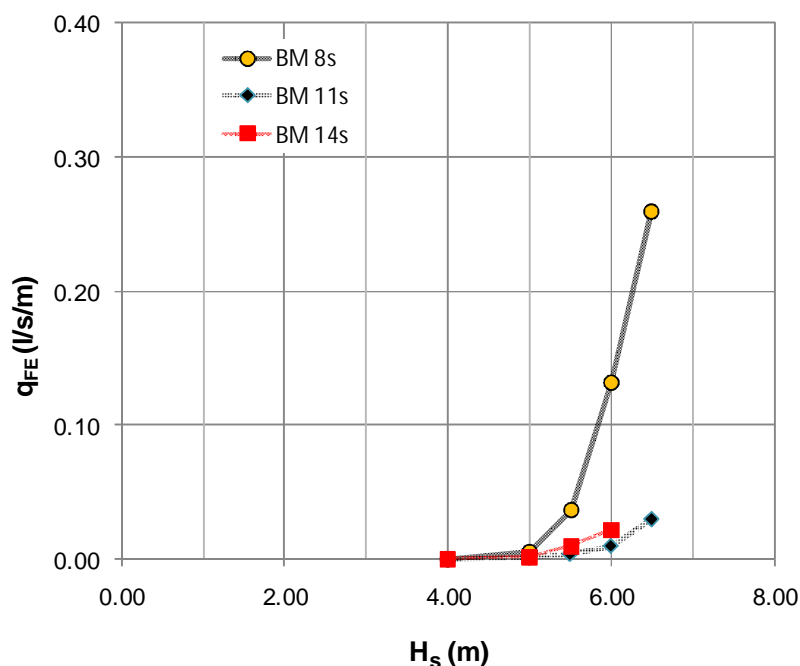


Figura 38 - Caudal médio de galgamento resultante das fórmulas empíricas para BM

Apesar da Figura 38 sugerir que o menor período leva ao maior galgamento, isto deve-se a que o valor de H_{m0} correspondente ao H_s pretendido varia com o período. Analisando os resultados para valores semelhantes de H_{m0} , o comportamento aproxima-se do do modelo físico. É de referir que os resultados das fórmulas empíricas para esta configuração da estrutura, talude 2:3, não variam com o período e daí o valor de H_{m0} ter um impacto mais significativo nos resultados.

O gráfico apresentado na Figura 39, apresenta, para o nível de maré de PM, o volume galgado por metro de desenvolvimento de estrutura obtido com esta ferramenta e que varia entre 0 e um valor máximo de 3.96 l/s/m, ocorrendo este último para o $T_p = 11$ s e para $H_s = 7.5$ m. O comportamento já descrito é em tudo semelhante ao do BM.

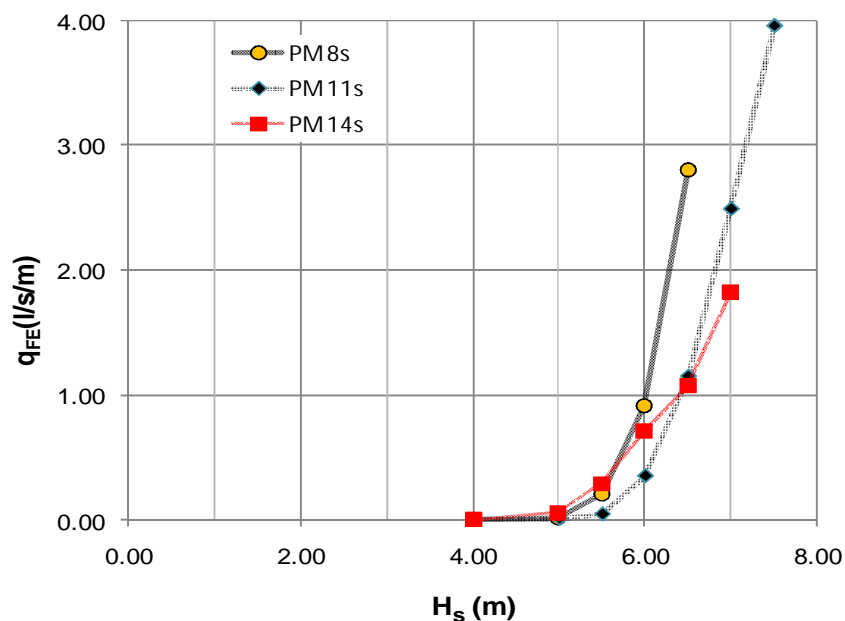


Figura 39 - Caudal médio de galgamento resultante das fórmulas empíricas para PM

O gráfico apresentado na Figura 40 representa, para o nível PM+S, o caudal galgado por metro de desenvolvimento de estrutura, que varia entre 0 e um valor máximo de 3.26 l/s/m, ocorrendo este último para o $T_p = 8$ s e $H_s = 6.5$ m, evidenciando um comportamento semelhante a BM e PM.

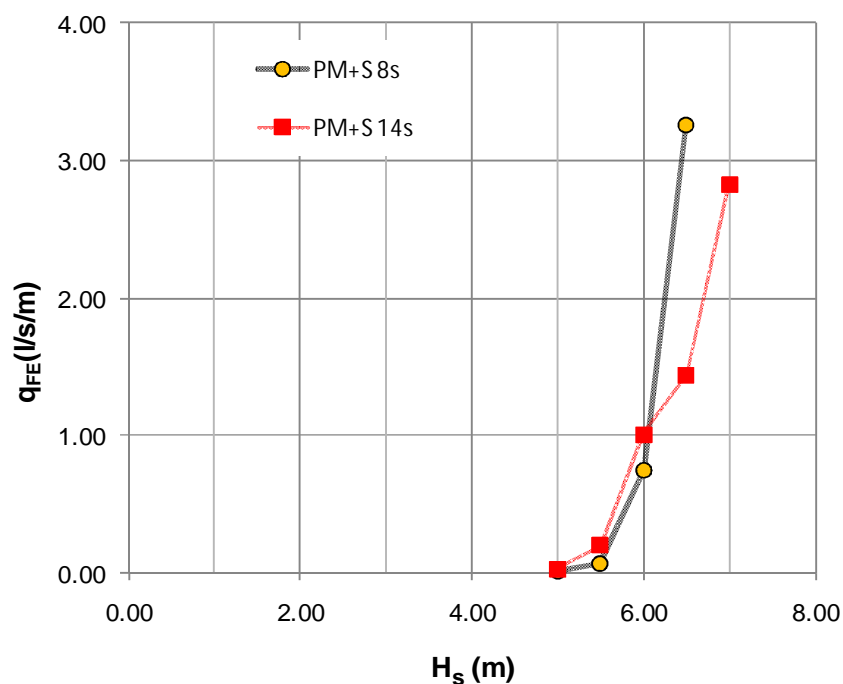


Figura 40 - Caudal médio de galgamento resultante das fórmulas empíricas para PM+S

4.3.2.NN_OVERTOPPING2

A ferramenta NN_OVERTOPPING2 encontra-se descrita no Capítulo 3, ponto 3.4.4. Tal como aí se refere, esta ferramenta necessita de 15 parâmetros hidráulicos e estruturais para calcular o galgamento, cujos valores para as condições ensaiadas se apresentam na Tabela 9. Todos estes parâmetros permitem uma melhor caracterização da estrutura e das condições hidráulicas em estudo e uma das grandes vantagens da sua utilização é que funciona para um vasto leque de configurações da estrutura.

Tabela 9 - Parâmetros de entrada no programa NN_OVERTOPPING2

Parâmetros de Entrada															
Nível de Maré (m (ZH))	b (°)	h (m)	H _{m0} (m)	T _{m-1.0} (s)	h _t (m)	B _t (m)	γ _f (-)	cotα _d (-)	cotα _u (-)	R _c (m)	B (m)	h _b (m)	tanα _B (-)	A _c (m)	G _c (m)
	0	6.00	2.6	7	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.0	7	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.5	7	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	5.0	7	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	5.2	7	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
+0.0	0	6.00	2.7	10	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	3.5	10	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.0	10	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.2	10	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.5	10	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	3.0	13	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	3.8	13	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.2	13	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.4	13	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	6.00	4.4	13	6.00	0.00	0.50	1.50	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	8.40	4.59
	0	8.00	2.3	7	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	3.6	7	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	4.3	7	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	4.8	7	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	5.4	7	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
+2.00	0	8.00	2.6	10	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	3.5	10	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	3.8	10	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	4.5	10	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	4.9	10	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	5.3	10	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	5.5	10	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	2.9	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	3.9	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	4.4	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	4.7	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	4.9	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	5.1	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	5.1	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.00	5.1	13	8.00	0.00	0.50	1.50	1.50	7.50	0.00	0.00	0.00	6.40	4.59
	0	8.50	3.2	7	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	3.7	7	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	4.5	7	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	5.2	7	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	5.2	7	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
+2.50	0	8.50	3.5	13	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	4.1	13	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	4.6	13	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	4.8	13	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59
	0	8.50	5.1	13	8.50	0.00	0.50	1.50	1.50	7.00	0.00	0.00	0.00	5.90	4.59

Na Tabela 10, além do caudal médio galgado, q_{NN} , apresentam-se os valores correspondentes aos intervalos de confiança de 95%, nas colunas $q_{2.5\%}$ e $q_{97.5\%}$.

Tabela 10 - Resultados do programa NN_OVERTOPPING2 para o caudal médio de galgamentos

			Gerador		Obra		Caudais Resultantes		
Ensaio Nº	Duração (horas)	Nível de Maré (m (ZH))	T _D (s)	H _S (m)	T _{m-1.0} (s)	H _{m0} (m)	Q _{NN} (l/s/m)	Q _{2.5%} (l/s/m)	Q _{97.5%} (l/s/m)
1	3		8	4.0	7	2.6	0.00	0.00	0.00
2	6			5.0	7	4.0	0.05	0.01	0.33
3	6			5.5	7	4.5	0.13	0.02	0.84
4	6			6.0	7	5.0	0.26	0.05	1.46
5	6			6.5	7	5.2	0.39	0.07	2.06
6	3	+0.0	11	4.0	10	2.7	0.00	0.00	0.00
7	6			5.0	10	3.5	0.06	0.01	0.38
8	6			5.5	10	4.0	0.14	0.02	0.65
9	6			6.0	10	4.2	0.23	0.04	1.03
10	6			6.5	10	4.5	0.41	0.09	1.79
11	3		14	4.0	13	3.0	0.04	0.00	0.53
12	6			5.0	13	3.8	0.27	0.05	1.30
13	6			5.5	13	4.2	0.57	0.13	2.29
14	6			6.0	13	4.4	0.90	0.21	3.30
1	3		8	4.0	7	2.3	0.00	0.00	0.00
2	6			5.0	7	3.6	0.10	0.02	0.39
3	6			5.5	7	4.3	0.43	0.11	1.45
4	6			6.0	7	4.8	1.05	0.27	3.49
5	6			6.5	7	5.4	2.17	0.57	7.47
6	3	+2.00	11	4.0	10	2.6	0.03	0.00	0.24
7	6			5.0	10	3.5	0.23	0.06	0.85
8	6			5.5	10	3.8	0.57	0.18	1.87
9	6			6.0	10	4.5	2.24	0.71	6.43
10	6			6.5	10	4.9	4.79	1.63	13.90
11	6		14	7.0	10	5.3	8.00	2.71	21.90
12	6			7.5	10	5.5	10.60	3.65	29.30
13	3			4.0	13	2.9	0.12	0.02	0.67
14	6			5.0	13	3.9	1.79	0.60	4.95
15	6			5.5	13	4.4	5.62	1.85	15.10
16	6			6.0	13	4.7	10.80	3.48	30.00
17	6			6.5	13	4.9	14.40	4.64	40.50
18	6			7.0	13	5.1	21.20	6.61	60.00
1	6		8	5.0	7	3.2	0.08	0.02	0.28
2	6			5.5	7	3.7	0.24	0.06	0.74
3	6			6.0	7	4.5	1.05	0.28	3.09
4	6			6.5	7	5.2	2.92	0.87	9.05
5	6	+2.50	14	5.0	13	3.5	1.01	0.29	3.37
6	6			5.5	13	4.1	4.12	1.40	11.20
7	6			6.0	13	4.6	14.00	4.82	37.50
8	6			6.5	13	4.8	18.40	6.36	49.60
9	6			7.0	13	5.1	30.00	9.98	84.40

Os resultados apresentados na Figura 41 representam os caudais galgados por metro de desenvolvimento de estrutura para o nível de maré BM.

Os valores de q_{NN} são crescentes com o aumento de H_s e com os períodos analisados, ao contrário dos resultados das fórmulas empíricas que não espelham o impacto do período no caudal galgado para a configuração da estrutura em causa (talude a 2:3).

O comportamento evidenciado pela NN_OVERTOPPING2 para BM é semelhante ao obtido no modelo físico. O mesmo se verifica para os níveis de PM e PM+S, como se mostra nas Figura 42 e Figura 43.

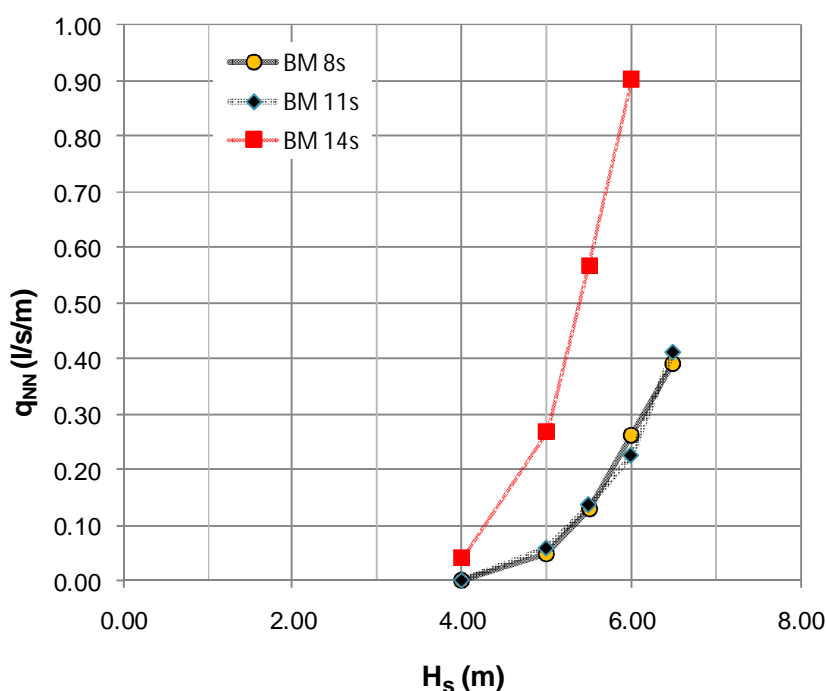


Figura 41 - Caudal médio de galgamento resultante do NN_OVERTOPPING2 para BM

Os volumes galgados obtidos para PM são significativamente superiores aos obtidos para o nível de maré anterior, BM. Embora os caudais sejam diferentes dos obtidos no modelo físico, o comportamento é muito semelhante, o que mostra que os parâmetros introduzidos na ferramenta de NN_OVERTOPPING2 permitem uma aproximação razoável à realidade.

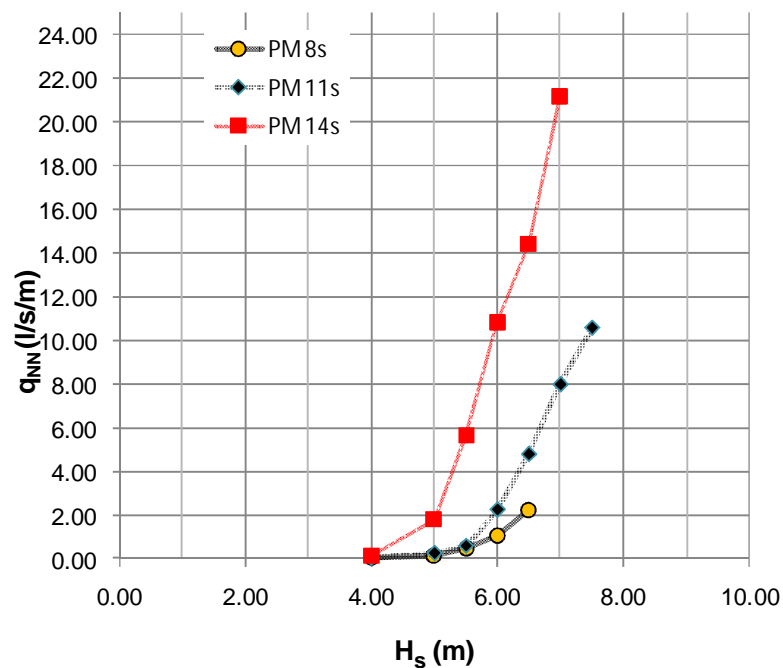


Figura 42 - Caudal médio de galgamento resultante do NN_OVERTOPPING2 para PM

Para PM+S, a diferença em relação ao modelo físico é que se verifica um aumento de caudal quando se passa de PM para PM+S. Esta diferença pode deve-se ao comportamento tridimensional do modelo físico.

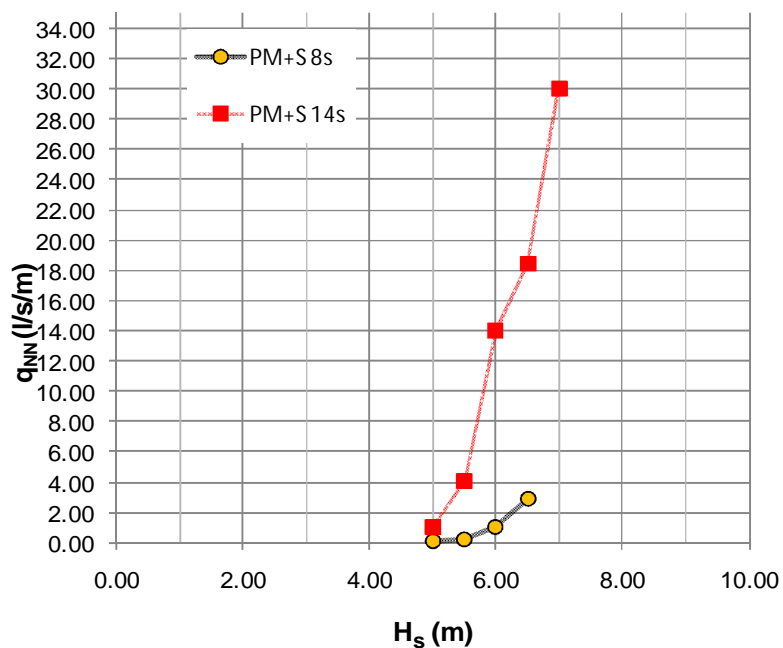


Figura 43 - Caudal médio de galgamento resultante do NN_OVERTOPPING2 para PM+S

4.4. Comparação de Resultados

Neste ponto pretende-se comparar os resultados das três ferramentas de cálculo do galgamento médio utilizadas para se efectuar o estudo do molhe cais do Porto de Rabo de Peixe nomeadamente, o modelo físico reduzido, a rede neuronal NN_OVERTOPPING2 e a ferramenta de cálculo empírica disponível online aplicável ao perfil tipo do Porto, (Figura 23). Esta comparação tem como objectivo identificar algumas limitações de cada ferramenta.

Tal como referido, na rede neuronal, NN_OVERTOPPING2, foram introduzidos 15 parâmetros, Figura 15 e na ferramenta empírica disponível online que tem por detrás uma fórmula empírica introduziram-se 7 parâmetros, Figura 12, que pudessem caracterizar a agitação marítima e a estrutura. Na Tabela 11 faz-se uma breve comparação dos parâmetros considerados em cada uma das ferramentas para o cálculo do galgamento. Salienta-se que a rede neuronal não leva em consideração a variação da batimetria, o que significa que a onda não é afectada pelo atrito de fundo, pela refacção, reflexão e difracção. Na fórmula empírica destaca-se a não consideração da profundidade (h) em frente à estrutura, o que influi directamente no galgamento.

Tabela 11 - Parâmetros considerados em cada ferramenta para a previsão do galgamento

Ferramentas	β	h	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	h_t	B_t	γ_f	$\cot\alpha_d$	$\cot\alpha_u$	R_c	B	h_b	$\tan\alpha_B$	A_c	G_c	Batimetria
Modelo Físico	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NN_OVERTOPPING2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Fórmula Empírica			x				x	x	x	x					x	

Os resultados dos caudais medidos no modelo físico, q_{MF} , e os obtidos na ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING2, q_{NN} , e na fórmula empírica, q_{FE} , para diferentes níveis de maré (BM, PM e PM+S) são apresentados na Tabela 12 e na Figura 44.

Tabela 12 - Resultados do Modelo Físico, NN_OVERTOPPING2 e Fórmula Empírica

Série	Ensaio	Duração (horas)	Nível de Maré (m (ZH))	Gerador		Obra			Q _{MF} (l/s/m)	Q _{NN} (l/s/m)	Q _{FE} (l/s/m)
	Nº			T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)	T _{m-1,0} (s)	H _{mo} (m)			
1	1	3			4.0	8	7	2.6	0.00	0.00	0.00
	2	6			5.0	8	7	4.0	0.00	0.05	0.01
	3	6		8	5.5	8	7	4.5	0.00	0.13	0.04
	4	6			6.0	8	7	5.0	0.00	0.26	0.13
	5	6			6.5	8	7	5.2	0.00	0.39	0.26
	6	3			4.0	11	10	2.7	0.00	0.00	0.00
	7	6			5.0	11	10	3.5	0.00	0.06	0.00
	8	6	+0.0	11	5.5	11	10	4.0	0.00	0.14	0.00
	9	6			6.0	11	10	4.2	0.00	0.23	0.01
	10	6			6.5	11	10	4.5	0.00	0.41	0.03
	11	3			4.0	14	13	3.0	0.00	0.04	0.00
	12	6		14	5.0	14	13	3.8	0.21	0.27	0.00
	13	6			5.5	14	13	4.2	0.37	0.57	0.01
	14	6			6.0	14	13	4.4	0.61	0.90	0.02
2	1	3			4.0	8	7	2.3	0.00	0.00	0.00
	2	6			5.0	8	7	3.6	0.04	0.10	0.02
	3	6		8	5.5	8	7	4.3	0.26	0.43	0.21
	4	6			6.0	8	7	4.8	0.48	1.05	0.91
	5	6			6.5	8	7	5.4	0.53	2.17	2.81
	6	3			4.0	11	10	2.6	0.00	0.03	0.00
	7	6			5.0	11	10	3.5	0.04	0.23	0.01
	8	6			5.5	11	10	3.8	0.08	0.57	0.05
	9	6	+2.00	11	6.0	11	10	4.5	0.45	2.24	0.35
	10	6			6.5	11	10	4.9	1.38	4.79	1.15
	11	6			7.0	11	10	5.3	1.85	8.00	2.49
	12	6			7.5	11	10	5.5	4.04	10.60	3.96
	13	3			4.0	14	13	2.9	0.00	0.12	0.00
	14	6			5.0	14	13	3.9	0.63	1.79	0.06
	15	6			5.5	14	13	4.4	2.86	5.62	0.30
	16	6		14	6.0	14	13	4.7	5.29	10.80	0.71
	17	6			6.5	14	13	4.9	7.99	14.40	1.07
	18	6			7.0	14	13	5.1	13.76	21.20	1.83
3	1	6			5.0	8	7	3.2	0.05	0.08	0.01
	2	6			5.5	8	7	3.7	0.11	0.24	0.07
	3	6		8	6.0	8	7	4.5	0.42	1.05	0.75
	4	6			6.5	8	7	5.2	0.86	2.92	3.26
	5	6	+2.50		5.0	14	13	3.5	0.24	1.01	0.03
	6	6			5.5	14	13	4.1	0.80	4.12	0.20
	7	6		14	6.0	14	13	4.6	3.07	14.00	1.01
	8	6			6.5	14	13	4.8	5.93	18.40	1.44
	9	6			7.0	14	13	5.1	9.52	30.00	2.83

No que se refere ao galgamento, para o nível de maré BM, verifica-se que, para os períodos de pico $T_p = 8$ s e $T_p = 11$ s, os valores obtidos em modelo físico são nulos e os obtidos pelo NN_OVERTOPPING2 não o são, como se observa na Figura 44.

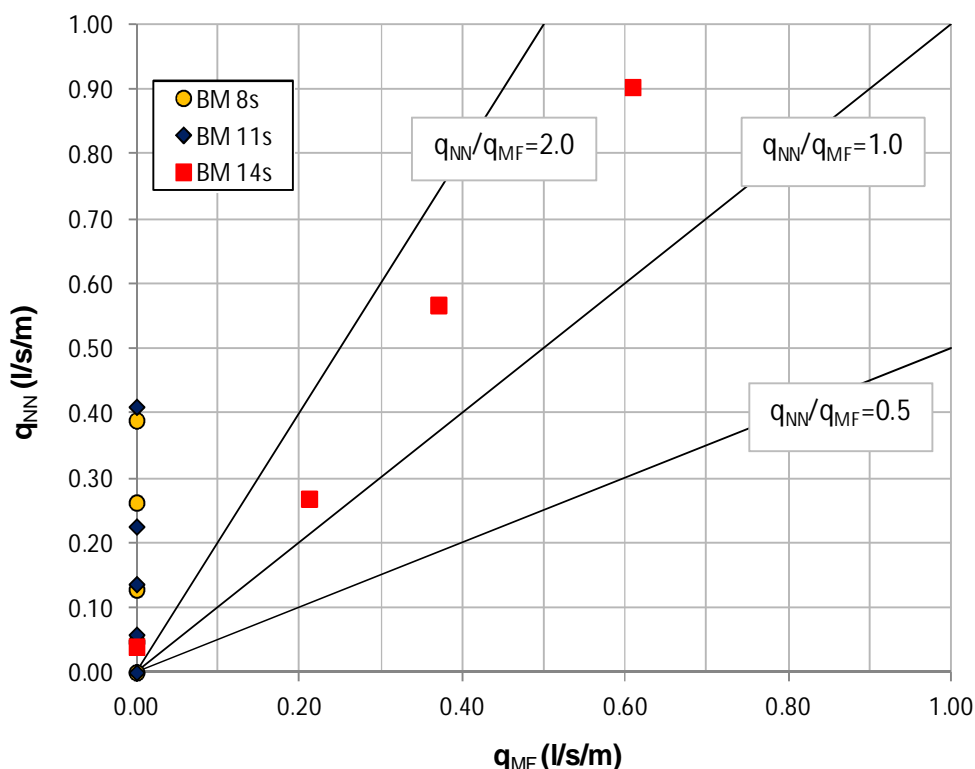


Figura 44 - Comparação de resultados para BM entre NN_OVERTOPPING2 e o modelo físico

Para BM, o $T_p = 14$ s é o único período para o qual os caudais médios previstos pelo NN variam entre, $1 \leq q_{NN}/q_{MF} \leq 2$, o que pode considerar-se bastante próximo dos resultados do modelo físico.

Comparando a fórmula empírica com o modelo físico verifica-se portanto que para os períodos de pico $T_p = 8$ s e $T_p = 11$ s, os valores obtidos pela fórmula empírica não são nulos, como apresentado na Figura 45.

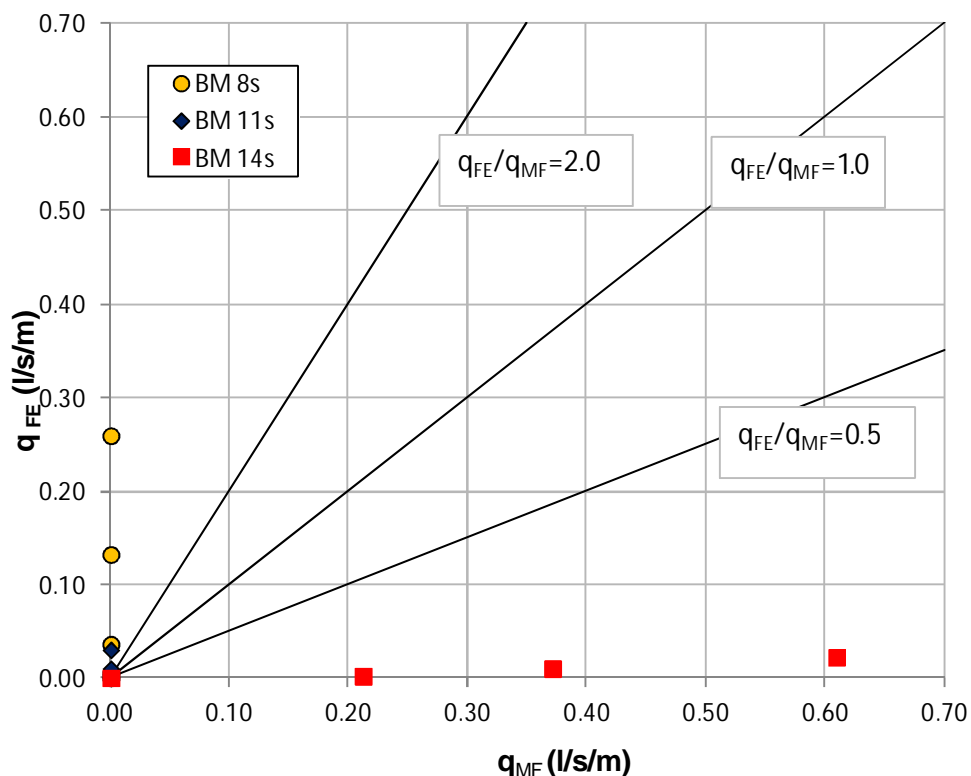


Figura 45 - Comparação de resultados para BM entre as fórmulas empíricas e o modelo físico

Todos os valores obtidos encontram-se fora dos intervalos $0.5 < q_{FE}/q_{MF} < 2$, ou seja, os valores obtidos pelas ferramentas empíricas diferem significativamente dos do modelo físico.

Para PM, como se pode observar na Figura 46, os resultados da ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING2 são superiores aos do modelo físico, embora próximos.

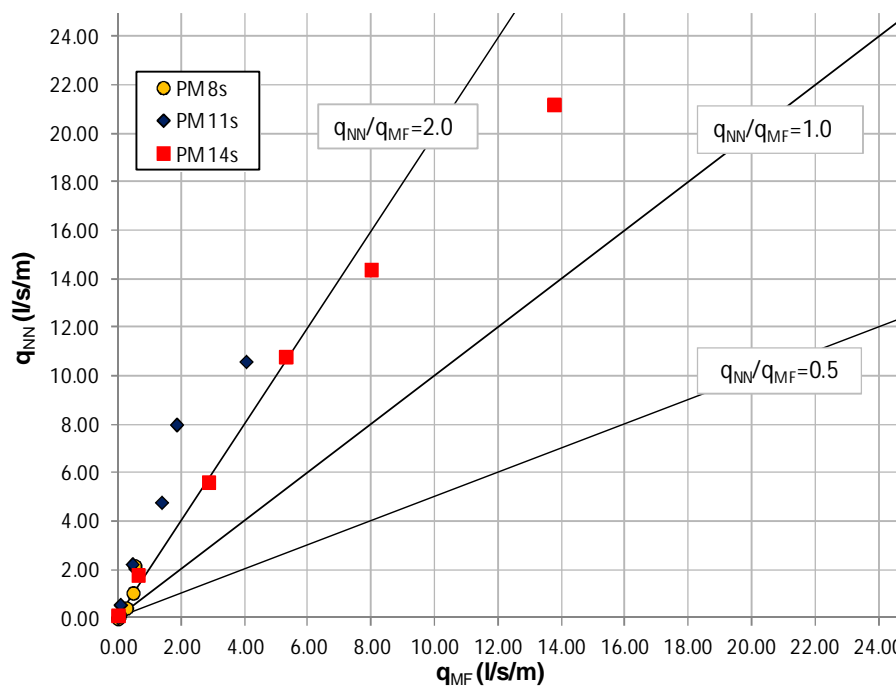


Figura 46 - Comparação de resultados para PM entre NN_OVERTOPPING2 e o modelo físico

Efectuando a comparação entre a ferramenta empírica e o modelo físico, Figura 47, constata-se que os valores obtidos encontram-se em geral abaixo da recta $q_{FE}/q_{MF} = 2.0$.

Apenas para $T_p = 11$ s os valores estão próximos da recta $q_{FE}/q_{MF} = 1.0$, ou seja, os resultados são idênticos, o que demonstra que, para este período as fórmulas empíricas conseguem prever os resultados do modelo físico.

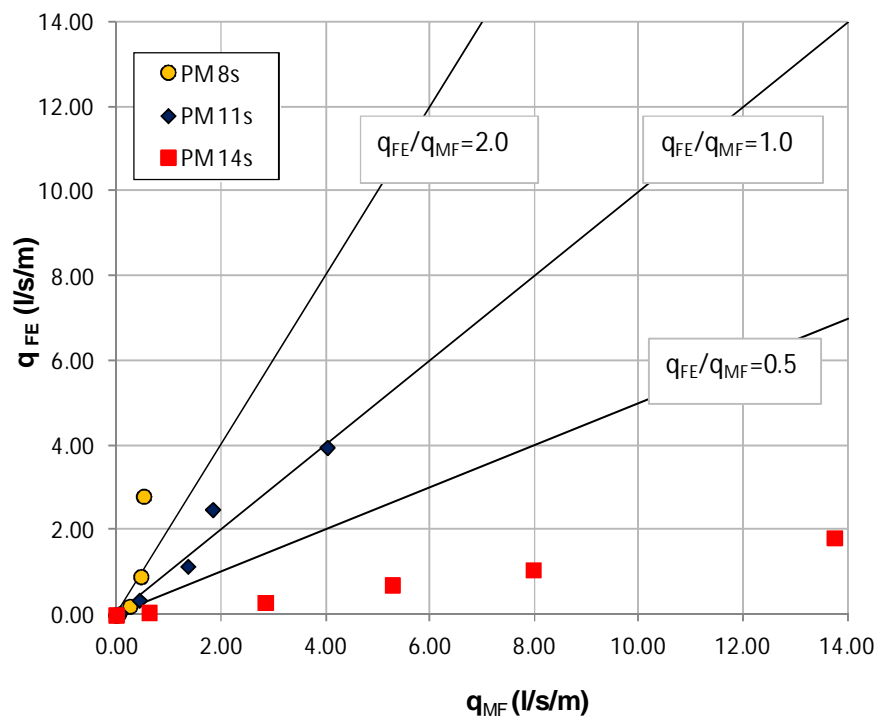


Figura 47 - Comparação de resultados para PM entre as fórmulas empíricas e o modelo físico

Da análise efectuada à Figura 48, para o nível de maré PM+S, conclui-se que a relação q_{NN}/q_{MF} é cerca de 3.

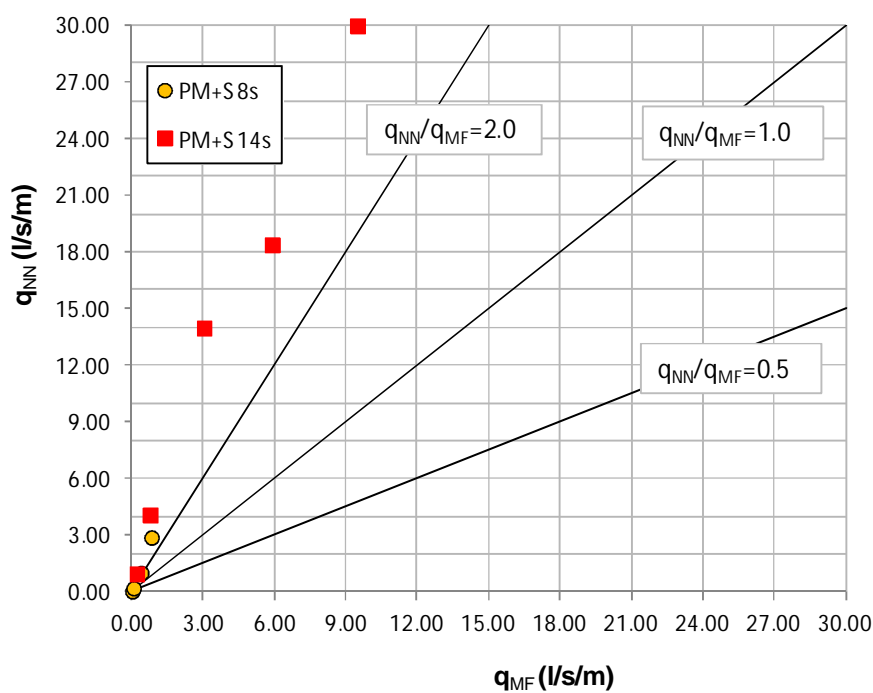


Figura 48 - Comparação de resultados para PM+S entre NN_OVERTOPPING2 e modelo físico

No que diz respeito à comparação entre a ferramenta empírica e o modelo físico para $T_p = 8$ s, os valores encontram-se próximos da recta $q_{FE}/q_{MF} = 2.0$, ou seja, o caudal previsto pela ferramenta empírica é superior ao caudal do modelo físico. Quanto ao $T_p = 14$ s, os valores tendem a aproximar-se da recta $q_{FE}/q_{MF} = 0.5$.

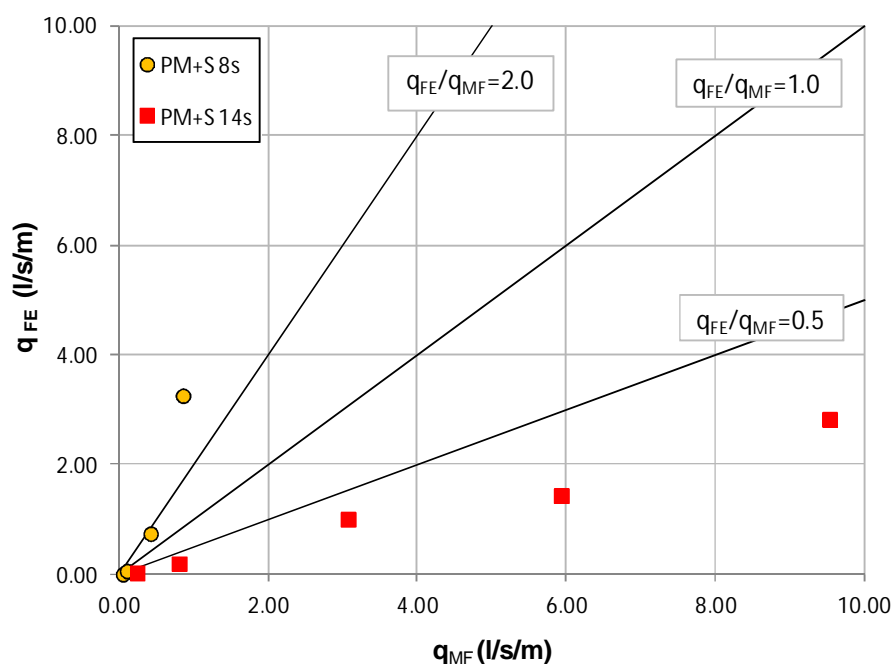


Figura 49 - Comparação de resultados para PM+S entre as fórmulas empíricas e o modelo físico

Esta análise comparativa permite verificar que:

- os caudais obtidos pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 são superiores aos medidos em modelo físico, o que pode levar a concluir que a rede neuronal prevê, neste caso, valores por excesso, estando portanto do lado da segurança, com a desvantagem de encarecer a obra;
- Os caudais obtidos pelas fórmulas empíricas não apresentam uma tendência constante relativamente ao modelo físico.

5. CONCLUSÕES

5.1. Síntese e Conclusões Gerais

Efectuou-se a comparação de algumas ferramentas de cálculo de galgamento disponíveis, nomeadamente as ferramentas empíricas disponíveis online, a rede neuronal NN_OVERTOPPING2 e o modelo físico reduzido. O objectivo desta comparação foi identificar algumas vantagens e limitações de cada ferramenta quando aplicada a um caso de estudo, que neste caso foi o molhe cais do Porto de Rabo de Peixe nos Açores. Com esta comparação pretende-se contribuir para uma melhor percepção do campo de aplicação destas ferramentas em projecto e o impacto que poderão ter em obra.

Existe uma procura constante para entender o fenómeno do galgamento assim como da sua correcta previsão através de fórmulas empíricas, modelos físicos reduzidos e, ultimamente, das redes neuronais. Esta necessidade surge de se tentar dimensionar estruturas de protecção portuárias seguras, de construção economicamente viável e que causem pouco impacto no meio ambiente envolvente. Como tal, os resultados de cada ferramenta estudada não devem ser menosprezados ou considerados de pouca importância, uma vez que todas as contribuições são importantes para o projecto final.

Com base na aplicação efectuada de cada ferramenta ao caso de estudo, podem sintetizar-se as limitações e vantagens encontradas que permitirão enquadrar o campo de acção do modelo físico reduzido, das ferramentas empíricas e das redes neuronais para um caso de estudo semelhante.

O estudo efectuado permitiu portanto chegar às seguintes conclusões principais.

5.2. Modelo Físico

As principais limitações que se prendem com a construção do modelo são as seguintes:

- Custo elevado (em relação às outras ferramentas);
- Tempo de construção morosa;
- Necessidade de mão-de-obra especializada para a construção;
- Necessidade de grande espaço disponível.

O modelo físico necessita de ser cuidadosamente utilizado, os seus resultados interpretados e o equipamento adequadamente mantido. Podem referir-se algumas limitações detectadas na exploração da mesma:

- Necessidade de mão-de-obra especializada para a exploração;
- Necessidade de equipamentos e software específicos;
- Calibração diária das sondas;
- Possíveis erros humanos (ao qualificar e quantificar o volume galgado);
- Possíveis dificuldades em medir o volume total galgado (local escolhido para colocação do recipiente pode não ser o ponto onde haja o galgamento máximo);
- Dificuldades em medir os volumes próximos de zero;
- Não considera o vento, logo os galgamentos sob a forma de borrifos não ocorrem conforme mencionado no Capítulo 2, ponto 2.1.

Como vantagens em relação a outras ferramentas podem enumerar-se:

- Reprodução da batimetria, obra e orla costeira à escala;
- Consideração dos efeitos tridimensionais do modelo (reflexão, refração e difracção);
- Comportamento muito próximo da realidade;
- Utilizada numa fase avançada de projecto (projecto base, projecto de execução).

5.3. Fórmulas Empíricas

Relativamente às fórmulas empíricas estas resultam de ensaios efectuados em modelos físicos bidimensionais, onde não existem efeitos tridimensionais, o que logo à partida limita a sua aplicação. De seguida apresentam-se algumas limitações e vantagens encontradas para esta ferramenta.

As principais limitações que se prendem com a utilização de fórmulas empíricas são as seguintes:

- Aplicável apenas para estruturas simples;
- Permitem a introdução de 7 parâmetros de entrada apenas (o que não é suficiente para descrever o comportamento hidráulico e estrutural);
- Não consideram a profundidade em frente à estrutura (h);
- Desenvolvidas com base em modelos bidimensionais para casos específicos.

Como vantagens em relação as outras ferramentas podem enumerar-se:

- Baixo custo (disponível online);
- Fácil utilização;
- Estabelecem previsões preliminares para o galgamento;
- Permite uma resposta rápida.

5.4. NN_OVERTOPPING2

No que diz respeito às redes neuronais, revelam um comportamento próximo ao do modelo físico reduzido. No entanto, neste caso, foram previstos caudais médios de galgamento superiores, o que se pode dever ao facto de esta ter sido desenvolvida com base em estudos bidimensionais e, como tal, os resultados obtidos não sofreram os efeitos tridimensionais.

De seguida apresentam-se algumas limitações e vantagens encontradas da aplicação da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

As principais limitações que se prendem com a utilização da ferramenta NN_OVERTOPPING2 que tem subjacente uma rede neuronal são as seguintes:

- Baseiam-se em ensaios em modelos físicos bidimensionais;
- Só deve ser utilizada apenas em fase de Estudo Prévio.

Como vantagens em relação as outras ferramentas podem enumerar-se:

- Aplicável a estruturas de geometria complexa;
- Resposta rápida em relação a modelos físicos;
- Permite introduzir 15 variáveis de entrada, o que leva a uma maior descrição da estrutura e das condições de agitação do que a ferramenta empírica;
- Além dos caudais médios de galgamento, disponibilizam os intervalos de confiança associados a esse valor.

5.5. Estudo Comparativo

O estudo comparativo das ferramentas permitiu que se retirassem as seguintes conclusões principais:

- o **modelo físico reduzido**, embora tenha algumas limitações no âmbito da construção e exploração, é a ferramenta de referência, de onde as fórmulas empíricas e as redes neuronais são provenientes. Aplicável na fase de projecto de execução, permitindo a optimização e o melhoramento de aspectos específicos do projecto antes de ser executado em obra, resultando por vezes em poupanças económicas significativas da solução inicialmente prevista.
- o facto das **fórmulas/expressões empíricas**, utilizadas no cálculo de galgamento, serem baseadas em geometrias simplificadas ensaiadas em laboratório, com base em ensaios bidimensionais, limita a previsão quando aplicadas na realidade, onde podem existir condicionantes que não foram representadas nesses ensaios. Efeitos tridimensionais importantes não são considerados.
- as **redes neuronais** são uma ferramenta versátil, aplicável a uma gama variada de estruturas, embora tenha limitações associadas aos ensaios realizados que, apesar de serem em grande número (8400 combinações) não

abrangem todas as situações. É aconselhável apenas a nível de Estudo Prévio.

Para o caso de estudo, o galgamento do Porto de Rabo de Peixe verificou-se que:

- os caudais obtidos pela ferramenta NN_OVERTOPPING2 são superiores aos medidos em modelo físico, o que pode levar a concluir que a rede neuronal prevê, neste caso, valores por excesso, estando portanto do lado da segurança, com a desvantagem de encarecer a obra;
- Os caudais obtidos pelas fórmulas empíricas não apresentam uma tendência constante relativamente ao modelo físico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Besley, P. (1999). Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual. Environment Agency, R&D Technical - Report W178, UK.
- Brito, S. (2007). Estudo de Galgamento em Estruturas Marítimas. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Novembro.
- Capitão, R. (2002). Modelação Estocástica Numérica e Física da Agitação Marítima. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Abril.
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering, 2nd edition. London (UK), CIRIA Publication C683.
- Clarke, S., Dodd, N. & Damgaard, J. (2004). Modelling flow in and above a porous beach. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 130(5): 223-233.
- Coeveld, E.M., Van Gent, M.R.A. & Pozueta, B. (2005). Manual Neural Network: NN_OVERTOPPING 2. CLASH WP8 – Report.
- Consulmar (2010). Obras de Expansão do Porto de Pesca de Rabo de Peixe (Ilha de S. Miguel). Ensaios em Modelo Reduzido. Especificações Técnicas. Consulmar Projectistas e Consultores Lda., Julho.
- Dalrymple, R.A. & Rogers, B.D. (2006). Numerical modeling of water waves with the SPH method. Coastal Engineering, 53(2-3): 141-147.
- De Rouck, J., Geeraerts, J., Troch, P., Kortenhaus, A., Pullen, T. & Franco, L. (2005). New results on scale effects for wave overtopping at coastal structures. Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05, Thomas Telford, London, 29-43.
- Didier, E. & Neves, M.G. (2009). Wave overtopping of a typical coastal structure of the Portuguese coast using a SPH model. Journal of Coastal Research, Special Issue 56: 496-500.
- Dodd, N. (1998). A numerical model of wave run-up, overtopping and regeneration. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 124(2): 73-81.
- Franco, L., Briganti, R. & Bellotti, G. (2004). D32 Ostia Site: Report on Full Scale Measurements (2nd Full Winter Season). CLASH WP3 – Report.
- Führböter, A. (1986). Model and prototype tests for wave impact and run-up on a uniform 1:4 slope. Coastal Engineering, 10: 49-84.

- Geeraerts, J. & Boone, C. (2004). D31 Report on Full Scale Measurements – Zeebrugge: 2nd Full Winter Season. CLASH WP3 – Report.
- Geeraerts, J. & Willems, M. (2004). D35 Final Report on Laboratory Measurements – Ostia. CLASH WP4 – Report.
- Haykin, S. (2001). Redes Neurais. Princípios e Prática. Porto Alegre, RS: Bookman.
- Hedges, T.S. & Reis, M.T. (1998). Random wave overtopping of simple seawalls: a new regression model. Water, Maritime & Energy Journal, Proc. ICE, 130(1): 1-10.
- Hedges, T.S. & Reis, M.T. (2004). Accounting for random wave run-up in overtopping predictions. Maritime Engineering, Proc. ICE, 157(3): 113-122.
- Hordijk, D. (2004). D37 Report on Field Measurements – Petten Sea Defence: Storm Season 2003-2004. CLASH WP3 – Report.
- Hu, K. & Meyer, D. (2005). The validity of the non-linear shallow water equations for modelling wave run-up and reflection. Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05, Thomas Telford, London, 195-206.
- Hu, K. (2000). High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling. PhD Thesis, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, UK.
- Hu, K., Mingham, C. & Causon, D. M. (2000). Numerical simulation of wave overtopping of costal structures using the nonlinear shallow water equations. Coastal Engineering 41(4): 433-465.
- Hudson, R. Y., Herrmann, F. A., Sager, R. A., Whalin, R. W., Keulegan, G. H., Chatham, C.E., Hales, L. Z. (1979). Coastal hydraulic models, Special Report No. 5. U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Hughes, S.A. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. Advanced Series on Ocean Engineering - Vol. 7, World Scientific Publishing, Singapore.
- Ingram, D.M., Causon, D.M., Mingham, C.G. & Zhou, J.G. (2002). Numerical simulation of violent wave overtopping. Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2286-2298.

- Ingram, D.M., Causon, D.M., Gao, F., Mingham, C.G., Troch, P., Li, T. & De Rouck, J. (2004). Free Surface Numerical Modelling of Wave Interactions with Coastal Structures. CLASH WP5 – Report, Manchester Metropolitan University and University of Gent, Manchester, UK.
- Kortenhaus, A., Van Der Meer, J.W., Burcharth, H.F., Geeraerts, J., Pullen, T., Ingrand, D. & Troch, P. (2005). D40 Report on Conclusions of Scale Effects. CLASH WP7 – Report.
- Kortenhaus, A., Medina, J., Gonzalez-Escrivá, J. & Garrido, J. (2004a). D34 Laboratory Measurements on the Zeebrugge Breakwater. CLASH WP4 – Report.
- Kortenhaus, A., Oumeraci, H., Geeraerts, J., De Rouck, J., Medina, J.R. & Gonzalez-Escrivá, J.A. (2004b). Laboratory effects and further uncertainties associated with wave overtopping measurements. Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2005, 4456-4468.
- Lara, J.L., Garcia, N. & Losada, I.J. (2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. Coastal Engineering, 53: 395-417.
- Lin, P. & Liu, P.L.F. (1998). A numerical study of breaking waves in the surf zone. Journal of Fluid Mechanics, 359: 239-264.
- Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R. & Gonzalez-Odina, J.M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. Coastal Engineering, 55(1): 47-62.
- Mase, H.; Reis, M.T.; Nagahashi, S.; Saitoh, T.; Hedges, T.S. (2007). Effects of zero-overtopping data in artificial neural network predictions. Proc. Coastal Structures 2007, Veneza, Itália, 2 a 4 de Julho de 2007, 1542-1551.
- Medina, J.R., De Rouck, J., Figueres, M., Gonzalez-Escrivá, J. & Geeraerts, J. (2005). D43 Synthesis and Design Guidelines. CLASH WP9 – Report.
- Medina, J.R., Gonzalez-Escrivá, J.A., Garrido, J. & De Rouck, J. (2002). Overtopping analysis using neural networks. Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 2165-2177.
- Moreira, M.A. (1997). Introdução às Redes Neurais Artificiais. Outubro. Consultado a 08/06/2011, do endereço http://ltodi.est.ips.pt/mmoreira/PUBLICACOES_P/introducao_redes_neuronais_1997.pdf

- Neves, M.G., Reis, M.T., Losada, I. & Hu, K. (2008). Wave overtopping of Póvoa de Varzim breakwater: physical and numerical simulations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(4): 226-236.
- PIANC (1992). Analysis of rubble mound breakwaters. Permanent International Association of Navigation Congress.
- Pita, C.A.R.M. (1984). Dimensionamento de Quebra-mares e dos seus Elementos Construtivos. Emprego de Blocos de Betão no Perfil-corrente de Quebra-mares de Talude. Relatório 126/85 - NPP. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio.
- Puertos del Estado (2002). R.O.M. 0.0. General procedure and requirements in the design of harbor and maritime structures. Part I: Recommendations for Maritime Structures. Technical Report, Puertos del Estado, Spain.
- Pullen, T. & Allsop, N.W.H. (2004a). D36 Final Report on Laboratory Measurements – Samphire Hoe. CLASH WP4 – Report.
- Pullen, T. & Allsop, N.W.H. (2004b). D33 Report on Full Scale Measurements – Samphire Hoe. CLASH WP3 – Report.
- Pullen, T. & Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H. & Van der Meer, J.W. (2007). EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, August.
- Reis, M.T. (1998). Probabilistic Assessment of the Safety of Coastal Structures. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Liverpool, Reino Unido, Janeiro.
- Reis, M.T., Hu, K., Hedges, T.S. & Mase, H. (2008). A comparison of empirical, semi-empirical and numerical wave overtopping models. *Journal of Coastal Research*, 24(2B): 250-262.
- Reis, M.T., Neves, M.G. & Hu, K. (2009). Wave overtopping of a porous structure: numerical and physical modeling. *Journal of Coastal Research*, SI 56(II): 539-543.
- Santos, J.A. (2006). Curso de Modelação Física em Hidráulica Marítima, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

- Shao, S., Ji, C., Gram, D.I., Reeve, D.E., James, P.W. & Chadwick, A.J. (2006). Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model. *Coastal Engineering*, 53: 723-725.
- Steendam, G.J., Van der Meer, J.W., Verhaeghe, H., Besley, P., FRANCO, L. & VAN GENT, M.R.A. (2004). The international database on wave overtopping. *Proc. 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, 4301-4313.
- Tafner, M. (1998). Redes Neurais Artificiais: Aprendizado e Plasticidade; Revista "Cérebro & Mente", 2(5), Março/Maio, consultado a 08/06/2011, do endereço <http://www.cerebromente.org.br/n05/tecnologia/rna.htm>
- USACE (2003). Coastal Engineering Manual. Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi (USA).
- USACE (2006). Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).
- Van der Meer, J.W., Tonjes, P. & De Waal, J.P. (1998). A code for dike height design and examination. *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '98*, Thomas Telford, London, 5-21.
- Van der Meer, J.W., Van Gent, M.R.A., Pozueta, B., Verhaeghe, H., Steendam, G.J. & Medina, J.R. (2005). Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures. *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, London, 259-268.
- Van Gent, M.R.A. (1994). The modelling of wave action on and in coastal structures. *Coastal Engineering*, 22: 311-339.
- Van Gent, M.R.A., Pozueta, B., Van den Boogaard, H.F.P. & Medina, J.R. (2005). D42 Final Report on Generic Prediction Method. CLASH WP8 – Report, WL | Delf Hydraulics and Polytechnic University of Valencia, December.
- Wedge, D.C.; Ingram, D.M.; Mingham, C.G.; Mclean, D.A.; Bandar, Z.A. (2005). Neural network architectures and overtopping predictions. *Maritime Engineering, Proc. ICE*, 158(MA3), 123-133.
- Wolters, G. (2007). Guidelines for Physical Model Testing of Breakwaters. Rubble Mound breakwaters. Hydralab III – Report, May.

ANEXO

(Artigo das 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária)